

30-0098/001

Untersuchungen an Bauteilen mit Vorspannung
ohne Verbund unter Brandbeanspruchung gemäß DIN 4102

Schlußbericht erstattet von

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Kordina
Dipl.-Ing. E. Richter

Dezember 1983

Die Untersuchungen wurden im Auftrag des Ministers für Landes- und Stadtentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf (Az.: VB 1-72.02 - Nr. 149/80), durchgeführt.

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Postsendungen:
Beethovenstraße 52, 3300 Braunschweig
Erfüllungsort und Gerichtsstand: Braunschweig

Fernsprecher: (05 31) 391 5431

Fernschreiber: 9 52 698 lbstb d
Telegrammadresse: MPA Braunschweig

Zur Vermeidung von Verzögerungen wird dringend gebeten, Zuschriften nur an das Institut zu richten, nicht aber an einzelne Mitarbeiter.

| | Seite |
|--|-------|
| 1 Einleitung | 2 |
| 2 Verhalten des Korrosionsschutzes bei erhöhten Temperaturen | 4 |
| 2.1 Versuchsaufbau und -durchführung | 5 |
| 2.2 Versuchsergebnisse | 8 |
| 2.3 Diskussion der Versuchsergebnisse | 15 |
| 3 Bauteil-Brandversuche | 18 |
| 3.1 Versuchsplanung und -vorbereitung | 19 |
| 3.1.1 Bemessung der Prüfkörper | 21 |
| 3.1.2 Baustoffe | 26 |
| 3.1.3 Temperaturmeßquerschnitte | 29 |
| 3.1.4 Lagerung und Trocknung | 31 |
| 3.2 Versuchsaufbau und -durchführung | 32 |
| 3.2.1 Brandraum und Beheizung | 32 |
| 3.2.2 Einbau und Belastung der Prüfkörper | 33 |
| 3.2.3 Meßprogramm | 39 |
| 3.2.3.1 Messung der Brandraumtemperatur | 40 |
| 3.2.3.2 Messung der Temperatur der Spannglieder und der schlaffen Bewehrung | 41 |
| 3.2.3.3 Messung der Vorspannkraft | 41 |
| 3.2.3.4 Messung der Zugkraft im Abspannelement | 42 |
| 3.2.3.5 Messung der Prüfkörperverformung | 42 |
| 3.2.4 Sonstige Beobachtungen | 43 |
| 3.3 Versuchsergebnisse | 43 |
| 3.3.1 Brandraumtemperatur | 43 |
| 3.3.2 Feuchtigkeitsgehalt der Prüfkörper | 43 |
| 3.3.3 Temperatur der Spannglieder | 43 |
| 3.3.4 Temperatur der schlaffen Bewehrung | 48 |
| 3.3.5 Prüfkörper VoV-1 | 48 |
| 3.3.5.1 Vorspannkraft | 48 |
| 3.3.5.2 Zugkräfte in den Abspannelementen | 50 |
| 3.3.5.3 Prüfkörperverformungen | 52 |
| 3.3.5.4 Sonstige Beobachtungen | 52 |
| 3.3.6 Prüfkörper VoV-2 | 53 |
| 3.3.6.1 Vorspannkraft | 53 |
| 3.3.6.2 Zugkräfte in den Abspannelementen | 55 |
| 3.3.6.3 Prüfkörperverformungen | 57 |
| 3.3.6.4 Sonstige Beobachtungen | 57 |
| 3.4 Diskussion der Versuchsergebnisse | 61 |
| 3.4.1 Trag- und Verformungsverhalten während der Brandbean- spruchung | 61 |
| 3.4.2 Versagen | 70 |
| 3.4.3 Andere Arbeiten | 76 |
| 3.5 Zusammenfassung | 77 |
| 4 Literatur | 79 |
| Verzeichnis der Anlagen | 82 |

1. Einleitung

Im Teil 6 der DIN 4227 [1] wird die Bemessung und Ausführung von Bauteilen geregelt, bei denen die Spannglieder ohne schubfesten Verbund zum umgebenden Betonquerschnitt eingebaut sind. In den letzten Jahren sind für diese Bauweise spezielle Vorspannsysteme entwickelt worden. Der Spannstahl, für den heute fast ausschließlich siebendrähtige Litzen aus St 1570/1770 mit 100 oder 140 mm² Normquerschnitt (12,9 bzw. 15,3 mm Nenndurchmesser) zur Anwendung kommen [2], wird werkmäßig mit einem Kunststoffrohr aus Polyäthylen oder Polypropylen ummantelt, das als zusätzlichem Korrosionsschutz mit einer beständigen Fettsubstanz gefüllt wird. Dieser vom Herstellerwerk erstellte Korrosionsschutz, dessen Wirkungsweise unabhängig ist von der Rißbildung bzw. von einer möglichst ungerissenen Betondeckung, erlaubt den Einbau der Spannglieder mit geringer Betondeckung, "sofern nicht aus Gründen des Brandschutzes größere Werte erforderlich sind" [1]. Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollen durch experimentelle Untersuchungen zwei Fragenkomplexe bearbeitet werden, die sich im Zusammenhang mit brandbeanspruchten, ohne Verbund hergestellten Bauteilen ergeben.

Im ersten Teil der Arbeit soll untersucht werden, in welchem Umfang der Korrosionsschutz der Spanndrähte durch eine Temperaturbeanspruchung verändert wird. Es wird angestrebt, eine Grenztemperaturbeanspruchung zu finden, bis zu welcher der Korrosionsschutz als nicht beschädigt angesehen werden kann. Mit Hilfe solcher Grenztemperaturwerte besteht dann die Möglichkeit, für brandgeschädigte Bauteile, die ohne Verbund vorgespannt wurden, den erforderlichen Umfang von Sanierungsarbeiten an den Spanngliedern festzulegen, insbesondere dann, wenn diese Grenztemperaturwerte unter denen liegen, bei denen bleibende Veränderungen der Spannstahleigenschaften oder Spannkraftverluste zu erwarten sind.

Im zweiten Teil des Forschungsvorhabens soll das Tragverhalten brandbeanspruchter Durchlaufplattenstreifen studiert werden. In zwei Brandversuchen soll untersucht werden, welchen Einfluß die Verkehrslast im brandbeanspruchten Deckenfeld auf die Veränderung der Vorspannkraft hat. Besonders im Fall des durch keine Verkehrslast beanspruchten Deckenfeldes sind infolge der geringeren Durchbiegung des brandbeanspruchten Feldes bei gleichzeitiger thermischer Längung des Spannstahls größere Veränderungen der Vorspannkraft während des Brandgeschehens zu erwarten. Neben der zeitabhängigen Veränderung der Vorspannkraft sollen die Bauteilbrandversuche Aufschluß geben über die

Versagensart im Brandfall: infolge der unterschiedlichen Höhenlage erwärmen sich die Spannglieder am schnellsten in Feldmitte (kleinste Betonüberdeckung zur beflamnten Bauteiloberfläche), während sie im Auflagerbereich und in den anschließenden, nicht beflamnten Feldern, annähernd die Temperatur des Gebrauchszustandes behalten. Bei Raumtemperatur bewirkt der fehlende schubfeste Verbund zwischen Spannglied und Beton eine annähernd konstante Vorspannkraft über die gesamte Bauteillänge; in den Brandversuchen soll geklärt werden, in welchem Umfang die im Bereich der höchsten Spanngliedererwärmung auftretenden Hochtemperatur-Verformungen eine Abnahme der Spannkraft bewirken und damit ein Versagen durch Einschnürung der Betondruckzone einleiten, oder ob das Bauteilversagen im wesentlichen durch temperaturbedingte Festigkeitsabnahme im Spannglied verursacht wird.

Für die Erwärmungsversuche stellten die Firmen SUSPA Spannbeton-Gesellschaft (VSL-Monolitzen) und ALLSPANN Allgemeine Spannbeton Gesellschaft (DYWIDAG-Einzelspannglieder ohne Verbund) das umfangreiche Spannstahl-Probenmaterial kostenlos zur Verfügung. Die Prüfkörper für die Brandversuche wurden mit VSL-Monolitzen vorgespannt, die unentgeltlich von der Firma SUSPA Spannbeton Gesellschaft bereitgestellt wurden. Beiden Firmen sei für ihre großzügige Unterstützung herzlich gedankt.

2. Verhalten des Korrosionsschutzes bei erhöhten Temperaturen

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden Spannsysteme untersucht, bei denen der Korrosionsschutz im Herstellerwerk in Form eines durchgehenden Films aus Schutzfett (sekundärer Korrosionsschutz) und eines darüber gezogenen Kunststoffrohrs (primärer Korrosionsschutz) aufgebracht wird. In Tabelle 2.1 sind einige wichtige Spezifikationsmerkmale des Korrosionsschutzes für die untersuchten Spannsysteme zusammengestellt. Eine vollständige Spezifikation des Kunststoffmantels sowie des Schutzfettes ist in den Zulassungsbescheiden für die Spannverfahren enthalten [4, 5].

| Korrosionsschutz | | Spannstahl | Spannverfahren |
|---|--|--|---|
| Schutzfett | Kunststoffmantel | | |
| Calzium-Blei-verseiftes Komplexfett auf Mineralölbasis Bez.: Nontribos MP2 | Polyäthylen (PE) Bez.: Vestolen Mantelstärke ≥ 1 mm | 7-drähtige Litze $\varnothing 0,6$ " St 1570/1770 | VSL-Monolitzenspannverfahren ohne Verbund Spannverfahren DYWIDAG-Einzelspannglied ohne Verbund |

Tabelle 2.1: Spezifikation des Korrosionsschutzes

Beide Korrosionsschutzkomponenten reagieren relativ empfindlich auf erhöhte Temperaturen, nach Firmenangaben liegt der Tropfpunkt der Fettzwischen-schicht bei ca. 95 °C und der Schmelzbereich des Kunststoffrohrs bei ca. 130 °C. Diese Temperaturen liegen weit unter der kritischen Temperatur der Spannbewehrung, die für kaltgezogenen Spannstahl St 1570/1770 bei Ausnutzung der zulässigen Spannstahlspannung im Gebrauchszustand von $0,80 \cdot \beta_s$ bzw. $0,70 \beta_z$ [1] ungefähr 300 °C beträgt. Für die Beurteilung der Gebrauchsfähigkeit eines Bauteils mit Vorspannung ohne Verbund, das ohne größere Schäden (temperaturabhängiger bleibender Festigkeitsverlust der Bewehrung und des Betons, Abplatzungen) einen Brandangriff überstanden hat, wird damit der Grad der Beschädigung des Korrosionsschutzes zu einem maßgebenden Kriterium. Die Untersuchungen über die temperaturabhängigen Korrosionsschutzveränderungen wurden aus den o. g. Gründen auf den Temperaturbereich zwischen 100 °C und 300 °C beschränkt, wobei das Hauptziel der Untersuchungen auf die Beobachtungen mechanisch-physikalischer Veränderungen (Sprödigkeit, Rißbildung) gelegt wurde, während die durch Temperatureinwirkungen hervorgerufenen chemischen Reaktionen der Korrosionsschutzkomponenten nicht untersucht wurden.

Zur Beurteilung der Korrosionsbeständigkeit bzw. zum Erkennen von Fehlern im Korrosionsschutzsystem wurden die Materialproben nach der Erwärmung einer Beanspruchung in Schwitzwasser-Klimaten (SFW - DIN 50 017) [6] oder einer Beanspruchung im Kondenswasser-Wechselklima mit schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre (SFW 0,2 S DIN 50 018) [7] ausgesetzt. Zum augenscheinlichen Erkennen aufgetretener Korrosionsschäden infolge einer Klimabeanspruchung wurden die Proben nach der Klimabeanspruchung mit solchen Proben verglichen, die nur einer Temperaturbeanspruchung ausgesetzt waren.

2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Untersuchungen des Korrosionsschutzes wurden an 50 cm und 150 cm langen Stababschnitten durchgeführt. Die kürzeren Probestücke wurden senkrecht stehend ohne Betonummantelung erwärmt, während die längeren Probestücke, waagrecht liegend und von einer Betonform umschlossen, der Temperaturbeanspruchung ausgesetzt wurden.

2.1.1 Proben ohne Betonmantel

Die 50 cm langen Probestücke wurden mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 6 °C/min auf die festgesetzte Prüftemperatur erwärmt, danach mit dieser Prüftemperatur unterschiedlich lange beansprucht und schließlich im wiedererhaltenen Zustand der Klimabeanspruchung ausgesetzt. In Tab. 2.2 sind als Spalten- und Zeilenkennzeichnung die Untersuchungsparameter und als Zahlenmatrix die Anzahl der untersuchten Proben zusammengestellt. Die erste Zahl gibt die Anzahl der Proben wieder, die nur erwärmt wurden, während die zweite Zahl für die Probenanzahl steht, die nach der Erwärmung noch zusätzlich einer Klimabeanspruchung ausgesetzt wurde.

| Klimabeanspruchung Prüfung, | Anzahl d. Prüfungs- zyklen | Temperaturstandzeit [min] | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----------------|-----|-----|-----|
| | | 30 | | | | 180 | | | |
| | | Max. Temp. [°C] | | | | Max. Temp. [°C] | | | |
| | | 50 | 100 | 150 | 200 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| SFW - DIN 50 017 | 1 | 4+0 | 1+2 | 4+0 | 1+1 | 4+0 | 2+2 | 4+0 | 2+2 |
| | 5 | | 1+2 | | 1+1 | | 2+2 | | 2+2 |
| SFW 0,2 S DIN 50 018 | 1 | 4+0 | 1+2 | 4+0 | 1+1 | 4+0 | 2+2 | 4+0 | 2+2 |
| | 5 | | 1+2 | | 1+1 | | 2+2 | | 2+2 |

Tabelle 2.2: Untersuchungsparameter und Anzahl der Proben bei der Klimabeanspruchung der 50 cm langen Stababschnitte

Zur Erwärmung wurden die Proben senkrecht stehend, zum Teil auch auf einem Metallrost (Gitterabstand 14 mm) waagrecht liegend, in einen elektrisch beheizten Kammerofen eingebaut. Die Temperaturregelung erfolgte elektronisch im geschlossenen Regelkreis, wobei durch drei an einem Metallstab in unterschiedlicher Höhe angebrachte Thermoelemente (jeweils 5 cm vom Stabende und in Stabmitte) die Ofentemperatur gemessen wurde (Bild 2.1).

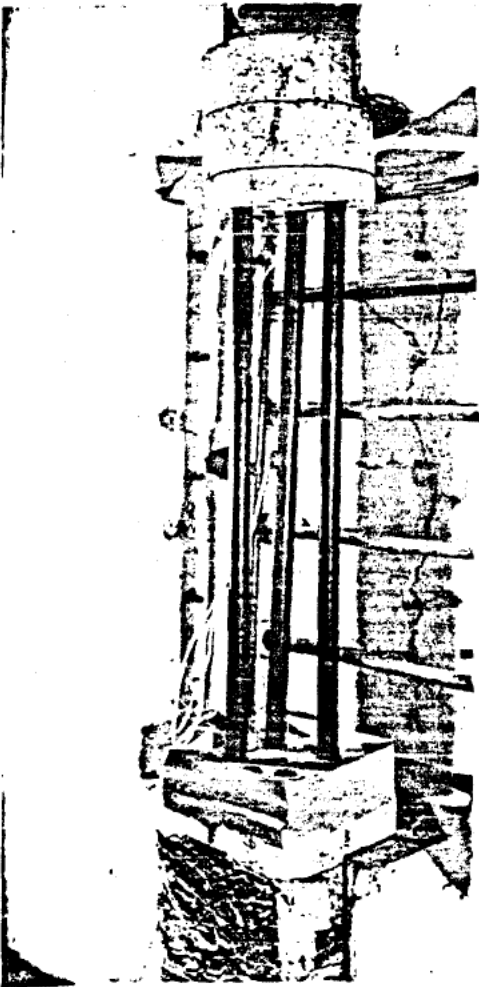


Bild 2.1: Geöffneter Kammerofen
mit eingebauten Proben
ohne Betonmantel

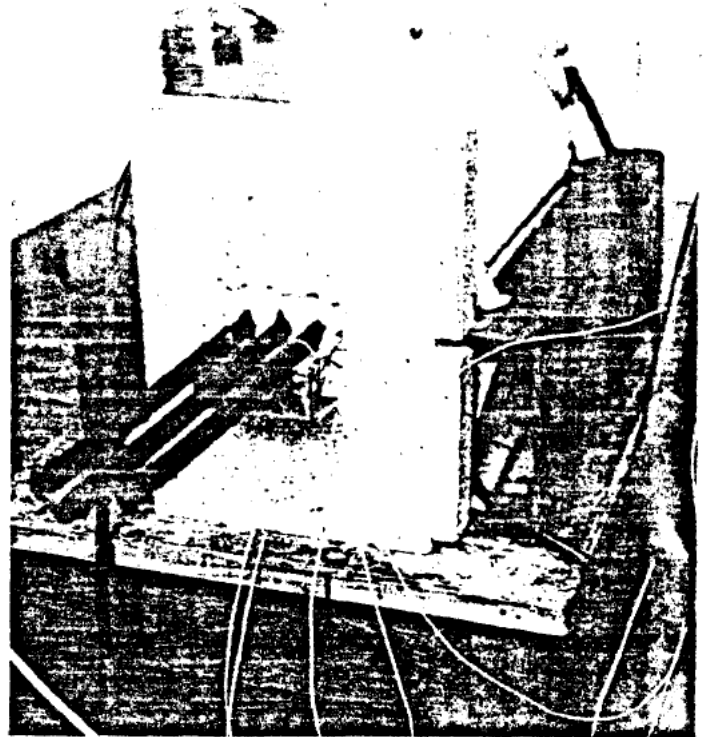


Bild 2.2: Ringofen mit eingebauten
Proben mit Betonmantel

2.1.2 Proben mit Betonmantel

Die kurzen Probestücke wurden somit annähernd über ihre gesamte Länge der vorgegebenen Prüftemperatur ausgesetzt. Im Bauteil sind aber die ohne Verbund verlegten Spannglieder in der Regel dem Momentenverlauf angepaßt, d. h. infolge des unterschiedlichen Abstandes von der beflammten Bauteiloberfläche tritt ein Temperaturgradient in Spanngliedlängsachse auf. Um diese Verhältnisse im Kleinversuch zu simulieren, wurden die 1,50 m langen Probestücke waagerecht liegend in einen 60 cm langen, elektrisch beheizten Ringofen eingebaut (Bild 2.2). Auf jeder Stirnseite ragten die Probestücke ca. 45 cm aus dem Ofen heraus. Die Proben wurden während der Temperaturbeanspruchung in eng anliegenden Betonformen gelagert (Bild 2.3), um damit ein ungehindertes Abtropfen des PE-Mantels zu verhindern. Die Temperaturentwicklung im Ofen und an den Stabüberständen außerhalb des Ofens wurde durch 6 Fe-Konst.-Thermoelemente gesteuert und registriert. Im Bild 2.3 sind die Lage der Thermoelemente sowie die Abmessungen des umgebenden Betonkörpers angegeben.

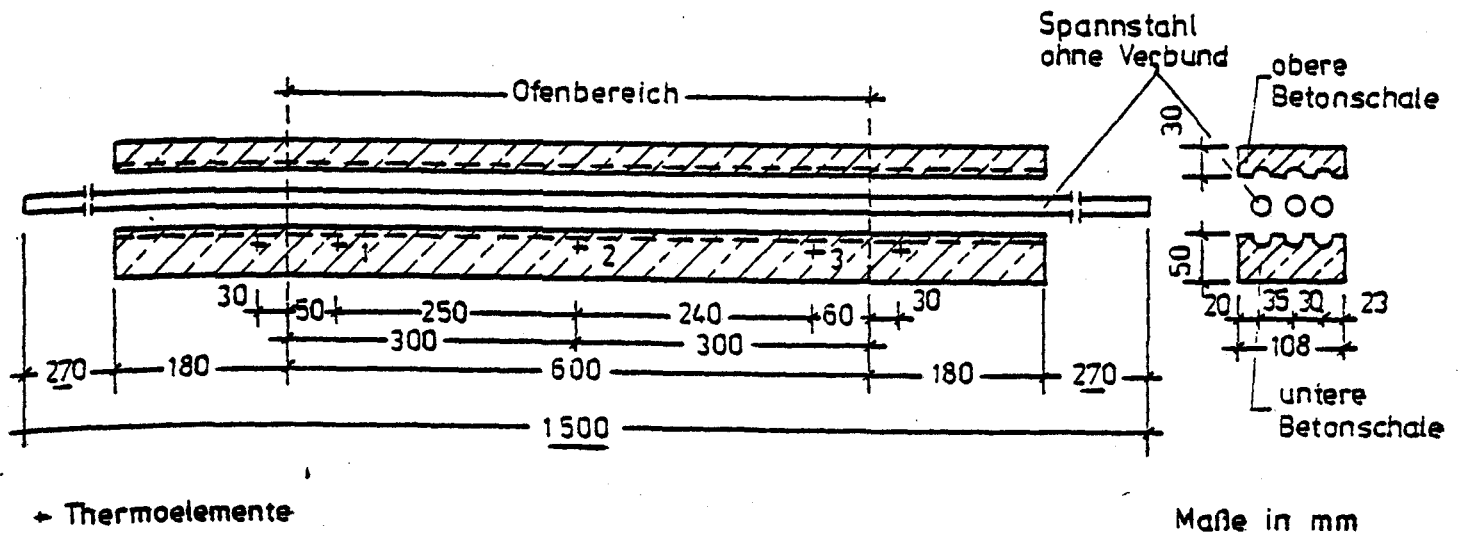


Bild 2.3: Versuchsaufbau für die Erwärmungsversuche bei waagerechter Prüfkörperstellung

2.2 Versuchsergebnisse

2.2.1 Proben ohne Betonmantel

In Tabelle 2.3 sind die beobachteten Veränderungen am Korrosionsschutz nach unterschiedlichen Temperaturbeanspruchungen zusammengefaßt

Ergänzend zu den Beobachtungen der Tabelle 2.3 muß mitgeteilt werden, daß das Korrosionsschutzfett aus schräg oder senkrecht gehaltenen Stababschnitten auch bei Raumtemperatur langsam heraustropft. Im Bauwerk werden deshalb nach dem Vorspannen die Ankerbereiche noch einmal zusätzlich mit Korrosionsschutzfett verpreßt.

Nach der Temperatur-Zeit-Beanspruchung wurde ein Teil der Stabproben der Klimabeanspruchung ausgesetzt. Aufgrund der erst bei höheren Temperaturen beobachteten Veränderungen am Kunststoffmantel wurden zunächst für jede Temperaturstandzeit (30 min, 180 min) nur die Proben mit der Temperatur von 100 °C und 200 °C für die Klimabeanspruchung ausgewählt. Um ein Eindringen der wasserdampfgesättigten Luft bzw. der schwefeldioxydhaltigen Atmosphäre über die Enden

| Temperatur-Zeit- beanspruchung | B e o b a c h t u n g e n |
|---|--|
| $T \leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t \leq 180\text{ min}$ | Glatte, rissefreie Oberfläche des PE-Mantels. Bei senkrechter Versuchsdurchführung geringer Fettaustritt am Fußpunkt der Probekörper. |
| $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t \leq 180\text{ min}$ | PE-Mantel beginnt sich zu verformen, bleibt aber über der ganzen Prüfkörperlänge geschlossen. Stellenweise spröde Oberfläche des PE-Mantels. Deutliche Fettansammlung am Fußpunkt der stehenden Versuchskörper. |
| $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t \leq 180\text{ min}$ | PE-Mantel "sackt" nach unten zusammen, so daß am oberen Versuchskörperende bis zu 10 cm Länge die Stahllitze freigelegt wird. Die Oberfläche des PE-Mantels ist rau und bildet deutlich die verseilte Litzenform ab. Am Fußpunkt der Versuchskörper bleibt nach Versuchsende ein dunkelbrauner Fettrückstand. |

Tabelle 2.3: Versuchsbeobachtungen: Proben ohne Betonmantel nach der Temperaturbeanspruchung

der Versuchsproben in das Korrosionsschutzsystem zu verhindern, wurden die Proben an beiden Enden mit Paraffin versiegelt.

Nach der Temperatur- und Klimabeanspruchung wurde zunächst der PE-Mantel untersucht. An ihm wurden keine - durch die Klimabeanspruchung hervorgerufenen zusätzlichen - Veränderungen festgestellt.

Anschließend wurde der PE-Mantel über die Stablängsachse aufgeschnitten, um die Korrosionsschutzfettschicht und die Stahllitze zu begutachten. Verglichen wurden jeweils 3 Proben:

- ohne Temperatur- und Klimabeanspruchung,
- nur temperaturbeansprucht,
- temperatur- und klimabeansprucht.

Die augenscheinlichen Untersuchungen des Spannstahls nach der Klimabeanspruchung SFW DIN 50 017 bzw. SFW O,2S DIN 50 018 zeigten keine Korrosionsschäden. Diese Aussage ist unabhängig von der vorhergegangenen Temperaturbeanspruchung, sie gilt sowohl für die nach einem Zyklus wie für die nach 5 Zyklen beendete Klimabeanspruchung.

Beim Korrosionsschutzfett wurden vor allen Dingen nach der Temperatureinwirkung deutliche Veränderungen in der Fettkonsistenz festgestellt; die anschließende Klimabeanspruchung brachte keine weiteren Veränderungen. Bis zu einer maximalen Temperatur von ca. 100 °C war das Fett augenscheinlich nicht vom ursprünglichen Fett (ohne Temperaturbeanspruchung) zu unterscheiden. Für Temperaturen > 100 °C wurden im Fett zunehmend kornförmige Einschlüsse festgestellt, und das Fett wurde stumpfer und trockener (ursprünglich: glatt und salbig). Bei den mit T = 200 °C erwärmten Proben war nach der Temperaturbeanspruchung keine Fettschutzschicht zwischen Stahl und PE-Mantel vorhanden. Verantwortlich dafür waren erstens die senkrechte Stellung der Proben im Ofen, wodurch Teile des erwärmten Fettes am Fußpunkt der Probe auslaufen konnten, sowie zweitens die hohe Prüftemperatur, bei der Teile des Fettes verbrannt sind. Diese aus der Versuchsdurchführung bedingten Einflüsse werden bei der Diskussion und der Wertung der Versuchsergebnisse im Abschnitt 2.3 besonders berücksichtigt.

2.2.2 Proben mit Betonmantel

Mit der im Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Versuchseinrichtung wurden insgesamt 6 Untersuchungen bei unterschiedlichen Prüftemperaturen und Probenlagerungsbedingungen durchgeführt. Der erste Versuch diente zum Austesten und Verbessern der Versuchseinrichtung, deshalb wurden seine Ergebnisse in den folgenden Ausführungen nicht mit aufgenommen.

Im Bild 2.4 sind für die Versuche 2 bis 6 die vorgegebene und die gemessene Temperatur-Zeit-Beanspruchung gegenübergestellt. Als Aufheizgeschwindigkeit wurde 1 °C/min festgelegt; die vorgesehenen maximalen Prüftemperaturen, die jeweils 30 Minuten auf die Probe einwirkten, sind tabellarisch im Bild 2.4 zusammengestellt.

Die beobachteten Veränderungen am Korrosionsschutz nach den unterschiedlichen Temperaturbeanspruchungen sind in der Tabelle 2.4 zusammengefaßt.

Ergänzend zur Tabelle 2.4 zeigen die Bilder 2.5 bis 2.8 Details nach den Erwärmungsversuchen. Die Betonschalen sind aufgeklappt.

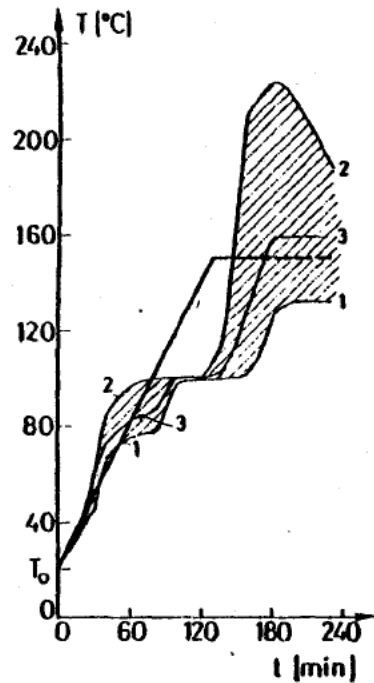
Im Bild 2.5 (Versuch 2) ist an der unteren Probe die deutlich abgebildete verseilte Litzenform sowie die raue und rissige PE-Manteloberfläche zu erkennen, beides Hinweise auf Temperaturen im beflamten Bereich von annähernd 200 °C.

Bild 2.6 (Versuch 3) zeigt die im Bereich des schadhaften PE-Mantels beobachteten dunkelbraunen Fettrückstände. Die Risse in den Betonschalen sind beim Ausbau der Proben nach dem Erwärmungsversuch entstanden.

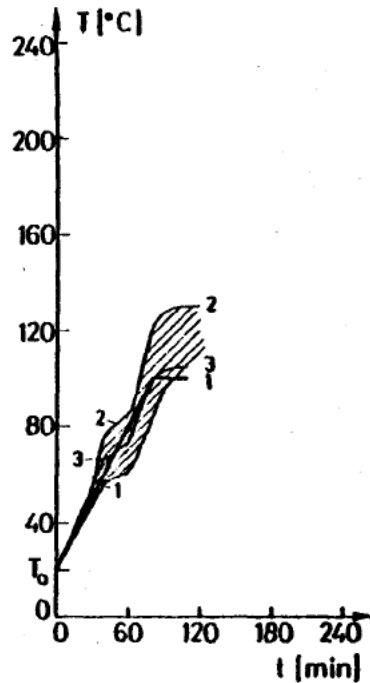
Der augenscheinlich unbeschädigte Korrosionsschutz von Versuch 4 bei der max. Prüftemperatur von ca. 100 °C zeigt Bild 2.7. Die dunkelbraunen Flecken von ausgelaufenem Fett stammen von vorhergehenden Versuchen.

Im Bild 2.8 sind 2 Spanndrähte nach dem Erwärmungsversuch Nr. 5 abgebildet, in diesem Versuch betrug die max. Prüftemperatur ca. 125 °C. Nach dem Versuch waren auf der PE-Manteloberfläche kleine Betonteilchen fest verklebt.

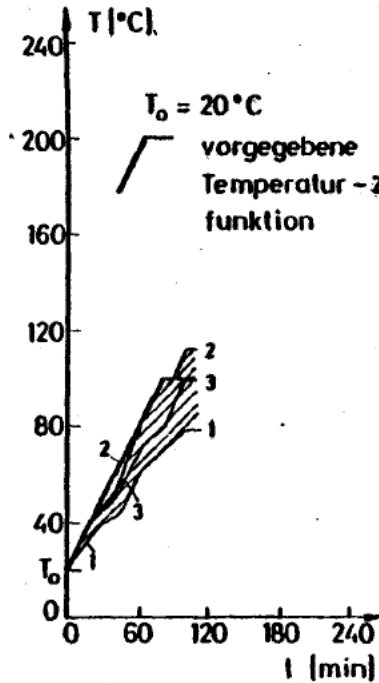
Versuch 2



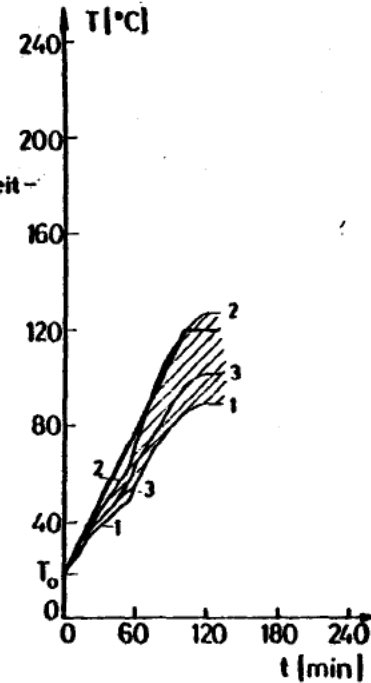
Versuch 3



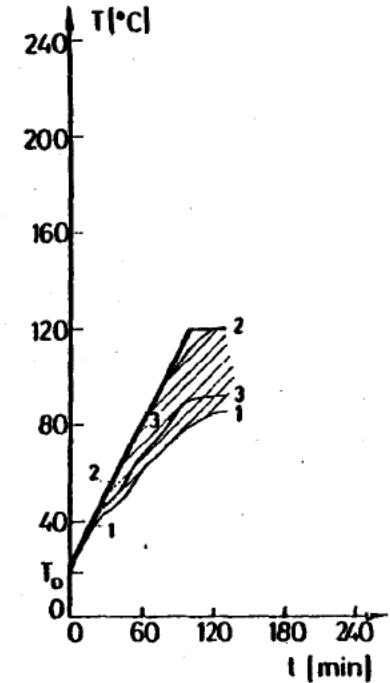
Versuch 4



Versuch 5



Versuch 6



| Vers. Nr. | max. Prüf-temp. [°C] |
|-----------|----------------------|
| 2 | 150 |
| 3 | 100 |
| 4 | 100 |
| 5 | 120 |
| 6 | 120 |

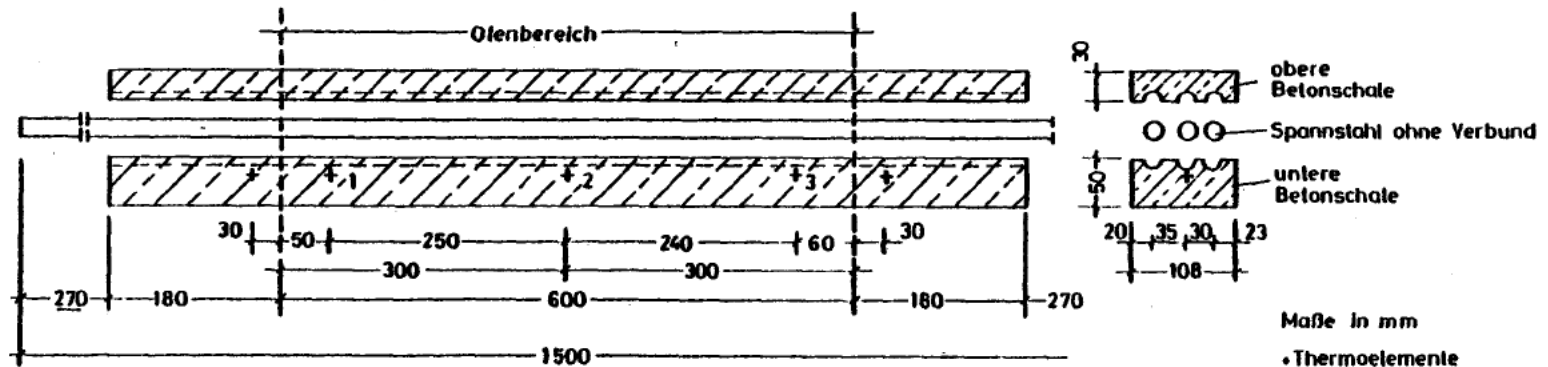


Bild 2.4: Vorgegebene und gemessene Temperatur-Zeit-Funktionen für die Proben mit Betonummantelung

| Vers. Nr. | vorg. max. Prüftemp. [°C] | Beobachtungen | Bemerkungen |
|-----------|---------------------------|---|--|
| 2 | 150 | PE-Mantel im Bereich der max. vorh. Temperatur ($\sim 230\text{ }^{\circ}\text{C}$) zerstört und im Bereich niedrigerer Temperaturen spröde und rissig. | Verzögerter Temperaturanstieg bei $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ infolge Verdampfung des Kapillarwassers im Beton. |
| 3 | 100 | PE-Mantel im Bereich der max. vorh. Temperatur $\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ teilweise zerstört, in diesem Bereich Fettaustritt. | |
| 4 | 100 | Max. vorh. Prüftemperatur $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; augenscheinlich keine Zerstörungen am PE-Mantel. | |
| 5 | 120 | Max. vorh. Prüftemperatur $\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$; keine Zerstörungen am PE-Mantel im betonummantelten Bereich; im Bereich des Spaltes zwischen oberer und unterer Betonschale teilweise Zerstörung des PE-Mantels. | Eindringen von Heißgasen im Spalt zwischen oberer und unterer Betonschale, dort Temperaturen $> 125\text{ }^{\circ}\text{C}$. |
| 6 | 120 | Max. vorh. Prüftemperatur $\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$; Oberfläche des PE-Mantels rauh und mit kleinen punktförmigen Löchern ($\varnothing \sim 0,5\text{ mm}$), aus denen Fett ausgetrieben wurde. | Horizontaler Spalt zwischen den Betonschalen isoliert. |

Tabelle 2.4: Versuchsbeobachtungen: Proben mit Betonmantel nach der Temperaturbeanspruchung



Bild 2.5: Erwärmungsversuch Nr. 2 mit Betonmantel



Bild 2.6: Erwärmungsversuch Nr. 3 mit Betonmantel

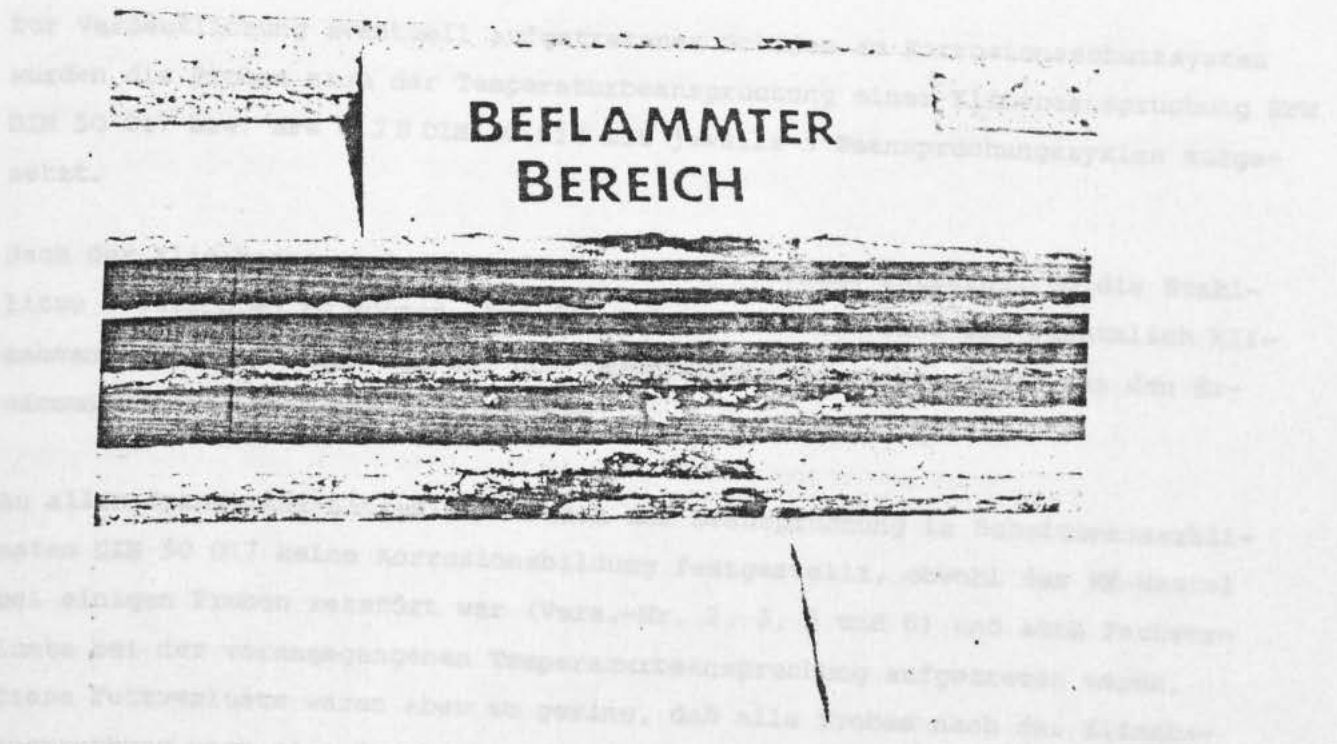


Bild 2.7: Erwärmungsversuch Nr. 4 mit Betonmantel

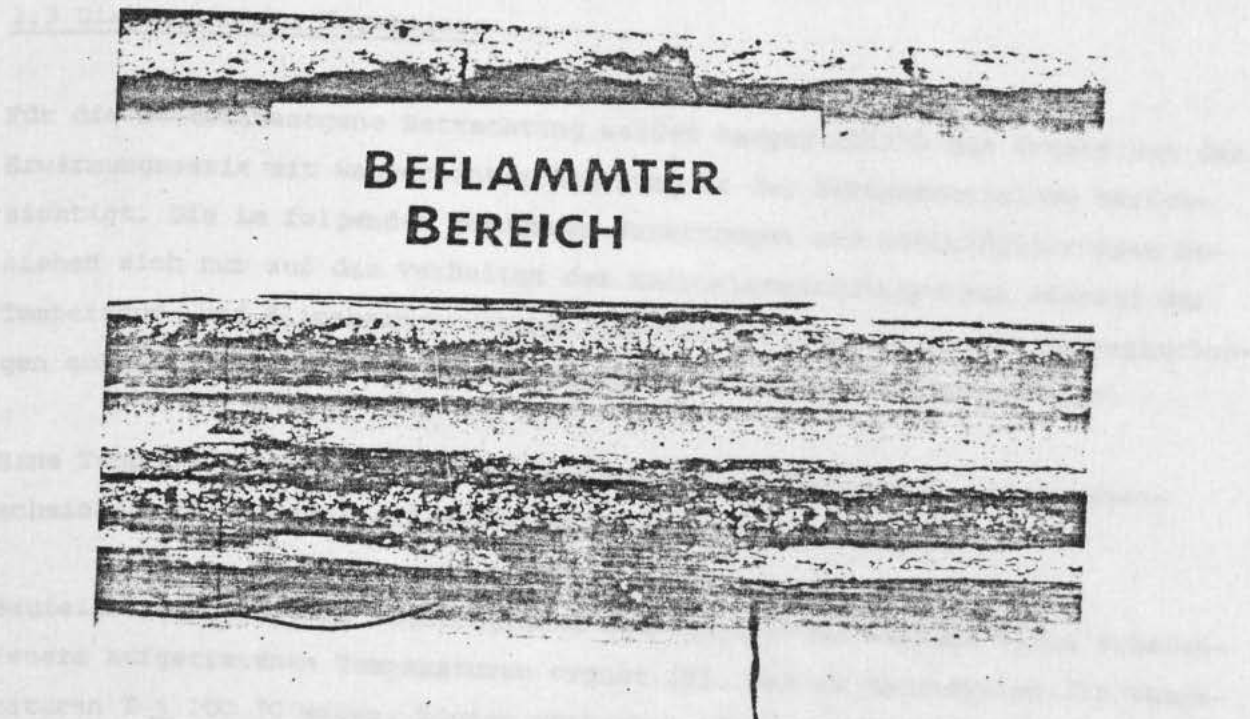


Bild 2.8: Erwärmungsversuch Nr. 5 mit Betonmantel

Zur Verdeutlichung eventuell aufgetretener Schäden am Korrosionsschutzsystem wurden die Proben nach der Temperaturbeanspruchung einer Klimabeanspruchung SFW DIN 50 017 bzw. SFW 0,2 S DIN 50 018 mit jeweils 5 Beanspruchungszyklen ausgesetzt.

Nach der Klimabeanspruchung wurde das Kunststoffrohr entfernt, um die Stahl-Litze begutachten zu können. Auf den Anlagen 1 bis 5 sind die zusätzlich klimabeanspruchten Litzen und die nur temperaturbeanspruchte Litze aus den Erwärmungsversuchen 2 bis 6 abgebildet.

An allen Spannstahl-Litzen wurde nach der Beanspruchung in Schwitzwasserklimaten DIN 50 017 keine Korrosionsbildung festgestellt, obwohl der PE-Mantel bei einigen Proben zerstört war (Vers.-Nr. 2, 3, 5 und 6) und auch Fettverluste bei der vorangegangenen Temperaturbeanspruchung aufgetreten waren. Diese Fettverluste waren aber so gering, daß alle Proben nach der Klimabeanspruchung noch eine durchgehende Fettschutzschicht aufwiesen. Bei der Beanspruchung im Kondenswasser-Wechselklima mit schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre DIN 50 018 wurden - mit Ausnahme der Probe aus Versuch 4 - an allen anderen Proben deutliche Korrosionsschäden festgestellt.

2.3 Diskussion der Ergebnisse

Für die bauteilbezogene Betrachtung werden hauptsächlich die Ergebnisse der Erwärmungsserie mit waagerechter Lagerung in der Betonummantelung berücksichtigt. Die im folgenden gezogenen Bewertungen und Schlußfolgerungen beziehen sich nur auf das Verhalten des Korrosionsschutzsystems während der Temperatur- und Klimabeanspruchung. Auswirkungen der genannten Beanspruchungen auf den Beton und den Bewehrungsstahl werden nicht angesprochen.

Eine Temperaturbeanspruchung von $\max T \leq 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ verursacht keine augenscheinlich feststellbare Zerstörung des Korrosionsschutzes.

Bauteile, für die eine nachträgliche Beurteilung der während eines Schadenfeuers aufgetretenen Temperaturen ergibt [8], daß am Spannsystem die Temperaturen $T \leq 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ waren, können weiterhin als gebrauchsfähig angesehen werden. Bei der nachträglichen Beurteilung der aufgetretenen Temperatur ist es wichtig, das vorhandene Rißbild im Beton zu beachten, da im Bereich von

Rissen, die bis an die Spannbewehrung durchgehen, der Korrosionsschutz schneller erwärmt wird als im ungerissenen Beton und dann u. U. eine örtlich begrenzte Verletzung des Korrosionsschutzes - vor allen Dingen des Kunststoffrohres - stattfindet (s. Tabelle 2.4, Versuch Nr. 5).

Die augenscheinlich festgestellte Veränderung des Kunststoffrohres bei Temperaturen von über 100 °C darf nicht automatisch gleichgesetzt werden mit der vollständigen Wirkungslosigkeit des gesamten Korrosionsschutzsystems. Die nach der Temperaturbeanspruchung durchgeführten Klimabeanspruchungen haben ergeben, daß eine Beanspruchung in Schwitzwasserklimaten DIN 50 017 keine Korrosionsschäden am Spannstahl hervorruft, wenn der sekundäre Korrosionsschutz (Fettschicht) durchgehend über die Stablänge erhalten bleibt; dieser Tatbestand wurde bei allen Versuchen erfüllt, selbst bei vorhandenen Temperaturspitzen von ca. 230 °C (s. Tabelle 2.4, Versuch Nr. 2). Bei einer Beanspruchung im Kondenswasser-Wechselklima mit schwefelhaltiger Atmosphäre nach DIN 50 018 traten nur dann keine Korrosionsschäden am Spannstahl auf, wenn der primäre (Kunststoffrohr) und der sekundäre Korrosionsschutz unverletzt waren (s. Tabelle 2.4, Versuch Nr. 4).

Für die nachträgliche Beurteilung des Korrosionsschutzes von brandbeanspruchten, im Bauteil eingebauten Spannsystemen muß die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Klimatests auf die Verhältnisse im praktischen Einsatz beachtet werden. Die Prüfung nach DIN 50 017 eignet sich besonders für die Beurteilung der Korrosionsbeständigkeit von Schutzüberzügen, während die Prüfung nach DIN 50 018 das schnelle Erkennen von Fehlern im Korrosionsschutzsystem ermöglicht. Das Auftreten von Fehlern im Korrosionsschutzsystem ist nicht gleichbedeutend mit dem Verlust der Korrosionsbeständigkeit. Unter Beachtung dieser Voraussetzung können die Ergebnisse der Erwärmungsversuche mit anschließender Klimabeanspruchung wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Am Korrosionsschutzsystem treten Fehler auf, wenn die maximale Temperatur während der Temperaturbeanspruchung größer als 100 °C wird.
2. Die Korrosionsbeständigkeit der untersuchten Korrosionsschutzsysteme bleibt erhalten, wenn die maximale Temperatur während der Temperaturbeanspruchung nicht größer als 200 °C wird. Für die im Bauteil verlegte Spannstahl-Bewehrung besteht unter diesen Bedingungen keine unmittelbare Korrosionsgefahr.

3. Das Ausmaß der Sanierung am Korrosionssystem bei einer aufgetretenen Temperaturbeanspruchung zwischen 100 °C und 200 °C muß unter Beachtung der Bedingungen im praktischen Einsatz getroffen werden. Die durchgeführten Untersuchungen nach DIN 50 017 und DIN 50 018 stellen Zeitraffer-Tests dar, die keine Aussage über das Verhalten der geprüften Teile im praktischen Einsatz erlauben.
4. Nach einer Temperaturbeanspruchung von über 200 °C war die Korrosionsbeständigkeit des Korrosionsschutzsystems in unzulässigem Umfang beeinträchtigt.
5. Gefährdet ist das Korrosionsschutzsystem an Stellen, an denen die schlaffe Bewehrung Kontakt mit dem Kunststoffrohr hat. Die Möglichkeit einer örtlichen Zerstörung des Kunststoffrohrs an der Kontaktstelle besteht vor allen Dingen dann, wenn die schlaffe Bewehrung näher zur beflamten Bauteiloberfläche angeordnet ist als die Vorspannbewehrung. Bild 2.9 zeigt das im Bereich einer metallischen Kontaktstelle zerstörte Kunststoffrohr

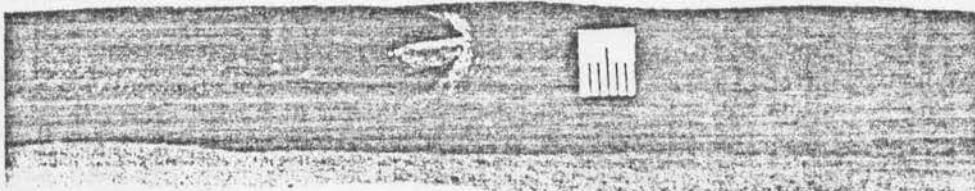


Bild 2.9: Zerstörtes Kunststoffrohr im Bereich einer metallischen Kontaktstelle nach der Temperatur- und Klimabeanspruchung

6. In [11] wird vorgeschlagen, das beschädigte Kunststoffrohr durch spiralförmig um die Litze gewickeltes Klebeband zu ersetzen. Das Klebeband soll aus Polyethylen mit hoher Dichte hergestellt sein und eine ausreichende Dicke aufweisen, wobei darauf zu achten ist, daß der Klebstoff keine zerstörenden Reaktionen am Kunststoffmaterial, am Korrosionsschutzfett oder am Stahl auslöst.

3. Bauteil-Brandversuche

In den Zulassungsbescheiden für Spannverfahren ohne Verbund [4, 5] werden Bauteile, die mit diesen Spannverfahren vorgespannt sind, hinsichtlich ihrer Feuerwiderstandsklasse solchen Bauteilen gleichgesetzt, die mit nachträglichem Verbund vorgespannt sind. Für die brandschutztechnische Bemessung gilt DIN 4102 Teil 4 [3]. Dort wird in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad des Spannstahls (vorh σ_z/β_z) die kritische Temperatur definiert, die der Spannstahl im Brandversuch erst nach Überschreiten der vorgesehenen Feuerwiderstandsdauer erreichen darf. Da bei der Erarbeitung der Norm gesicherte Materialdaten in ausreichender Menge fehlten, mußten die angegebenen Zahlenwerte auf der sicheren Seite liegend angegeben werden. Zur Einhaltung der kritischen Temperatur werden in DIN 4102 Teil 4 konstruktive Maßnahmen wie Mindestbauteilabmessungen und Mindestachsabstand der Bewehrung zur beflaminten Bauteiloberfläche vorgeschrieben. Das Bemessungskonzept der DIN 4102 Teil 4 setzt streng genommen voraus, daß die Spannstahlspannung im Bruchzustand bekannt ist, um damit die für die brandschutztechnische Bemessung maßgebende kritische Temperatur bestimmen zu können. In der Praxis werden jedoch i. a. die Gebrauchsspannungen des Kaltzustands eingesetzt, da geeignete Rechenmethoden für den heißen Zustand noch fehlen.

Die Berechnung des Bruchmoments bereitet für Spannbetonkonstruktionen ohne Verbund zwischen Spannglied und Beton wesentlich größere Schwierigkeiten als für die mit Verbund hergestellten. Bei fehlendem Verbund ist der unmittelbare Zusammenhang zwischen den Verformungen des Stahls und des Betons an den einzelnen Querschnitten nicht mehr gegeben, so daß die Zugkraft im Spannstahl nicht mehr wie üblich mit der Annahme vom Ebenbleiben der Querschnitte und der Gleichgewichtsbetrachtung am Querschnitt bestimmt werden kann. Bei Berechnung Vorspannung ohne Verbund tritt die Verträglichkeitsbedingung der Verschiebung anstelle der im Fall Vorspannung mit Verbund gültigen Verträglichkeit der Dehnungen.

Bei Normaltemperatur bestehen verschiedene Vorschläge zur vereinfachten Bestimmung der Zugkraftzunahme im Spannstahl bis zum Bruch, um so die sehr aufwendige Berechnung des Bruchwiderstandes von vorgespannten Konstruktionen ohne Verbund zu umgehen. In den Schweizer Vorschriften [9] wird von der Annahme ausgegangen, daß kein Zuwachs auftritt, in den deutschen Vorschriften [1] wird ein konstanter Zuwachs in Abhängigkeit von der Konstruktionsart (Einfeldbalken - Kragträger - Durchlaufträger) angenommen, während die amerikanischen Vorschriften [10] die Zunahme variabel über die Betonprismenfestigkeit und den Bewehrungsgehalt regeln.

Diese Auswahl einiger nationaler und internationaler Vorschriften macht die Schwierigkeiten deutlich, die für die brandschutztechnische Bemessung bestehen: Neben der realistischen Einschätzung des Bruchzustandes bei Raumtemperatur ist der Bruchzustand zusätzlich bei Brandeinwirkung wirklichkeitsnah zu beurteilen, um eine konstruktiv und wirtschaftlich befriedigende Bemessung zu erreichen. Die in diesem Forschungsvorhaben vorgesehenen zwei Brandversuche beschränken sich auf die Untersuchung eines Teilaspektes der o. g. Problematik: Es wird untersucht, welchen Einfluß die Verkehrslast im brandbeanspruchten Deckenfeld auf die Veränderung der Vorspannkraft während der Brandeinwirkung hat. Die Verkehrslast wird zwischen den Grenzwerten "keine Verkehrslast" und "volle Verkehrslast" variiert.

3.1 Versuchsplanung und -vorbereitung

Spannglieder ohne Verbund werden im Hochbau häufig in Flachdeckenkonstruktionen eingesetzt. Die Flachdecken haben im allgemeinen ein rechteckiges Stützenraster. Üblicherweise werden die Spannglieder parallel zu den Achsen geführt und im Stützenstreifen konzentriert und im Feldbereich mit großem Abstand angeordnet.

Im Brandversuch kann aufgrund der beschränkten Brandkammergröße nur ein Ausschnitt aus einer Flachdeckenkonstruktion untersucht werden. Als Prüfkörper wurde ein 9 m langer Plattenstreifen festgelegt, der aus einem 6 m langen, beflamten Feld mit beidseitig angrenzenden, 1,5 m langen Kragarmen bestand. Der Plattenstreifen war 1,10 m breit, die Plattendicke betrug 0,20 m; sie entsprach damit der Mindestdicke einer Spannbetondecke ohne Stützenkopfverstärkung für die Feuerwiderstandsdauer F 90 nach DIN 4102 Teil 4 [3], Tabelle 10. Die Platten waren in einer Richtung gespannt; als Vorspannbewehrung wurden jeweils 2 Spanndrahtlitzen St 1570/1770, Nenndurchmesser 15,3 mm (0,6") mit im Spannstahlwerk aufgebrachtem Korrosionsschutz eingebaut, zusätzlich wurde schlaffe Bewehrung verlegt (s. Abschnitt 3.1.1).

Der Versuchskörper wird als Ausschnitt aus einer über 5 Felder reichenden Flachdecke angesehen, bei der die Einzelfelder eine Spannweite von 6 m besitzen. Die Gesamtplattenlänge beträgt $5 \times 6 = 30$ m; sie entspricht damit dem maximal zulässigen Dehnfugenabstand nach DIN 1045, Abschnitt 14.4.2 [12]. Nach [1] sollen Spannglieder ohne Verbund zur Vermeidung großer Folgeschäden bei Brand nicht über mehr als einen Brandabschnitt durchlaufen.

Der beflamnte Plattenstreifen stellt das mittlere Plattenfeld dar. Im Bild 3.1 ist die als Grundlage dienende Gesamtkonstruktion und der daraus im Brandversuch geprüfte Ausschnitt dargestellt

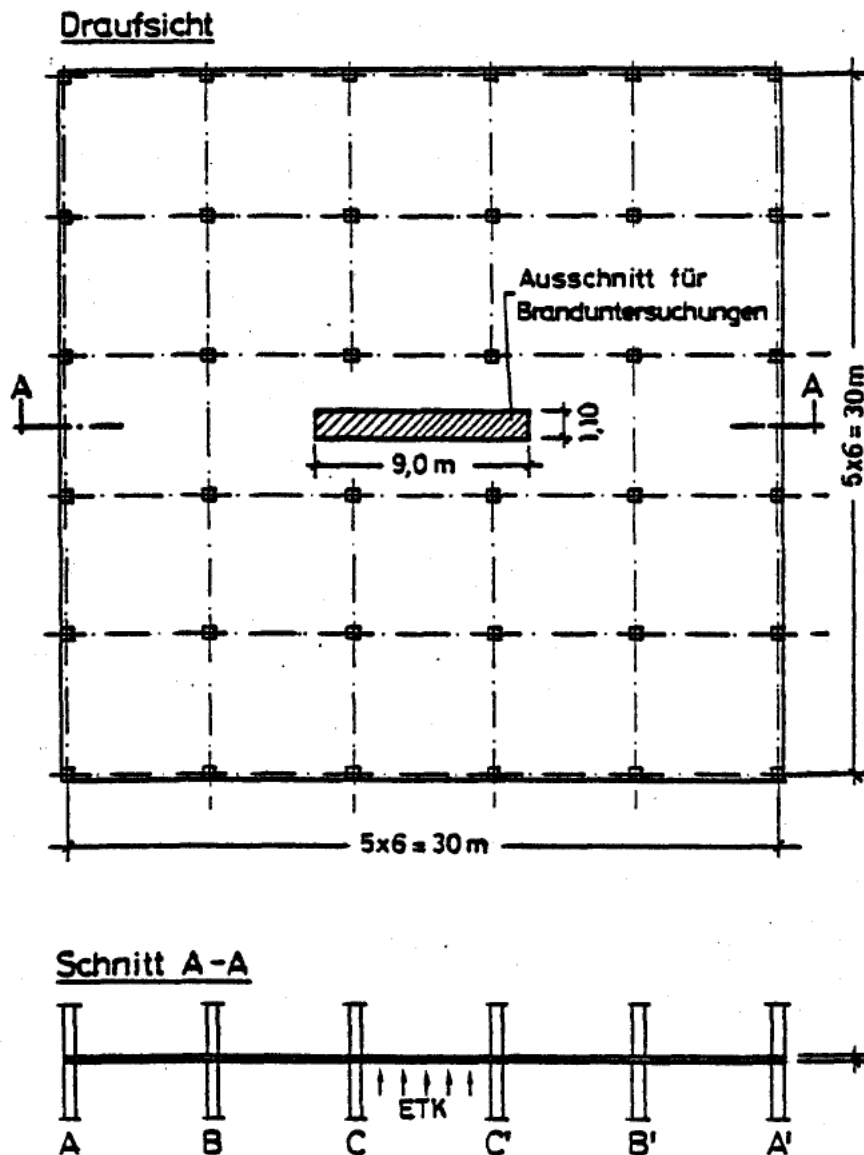


Bild 3.1: Zugrundegelegte Gesamtkonstruktion und der im Brandversuch geprüfte Ausschnitt

Zur Simulation der Durchlaufwirkung wurde bei den Versuchskörpern die Winkelverdrehung über den Auflagern behindert. Dazu wurden die Kragarme durch senkrechte Abspannelemente elastisch mit dem Prüfkammerboden verspannt. Die in den Platten angeordneten Spannglieder wurden an den Kragarmen

in Federtöpfe geführt, deren Federrate der des Spannstahls in den nicht beflamnten Feldern des 5-feldrigen Durchlaufträgers entsprach.

3.1.1 Bemessung der Prüfkörper

Es wurden zwei Prüfkörper mit der Bezeichnung VoV-1 und VoV-2 hergestellt. Prüfkörper VoV-1 wurde ohne Verkehrslast im brandbeanspruchten Feld geprüft, bei Prüfkörper VoV-2 wurde das brandbeanspruchte Feld mit einer Verkehrslast $p = 10 \text{ kN/m}^2$ belastet. In Tabelle 3.1 sind für die Prüfkörper das statische System, die Belastungsanordnung und die der Bemessung zugrunde liegenden Baustoffkennwerte zusammengestellt.

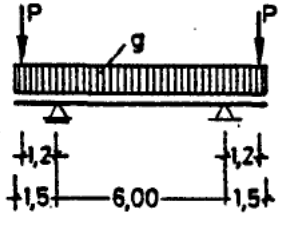
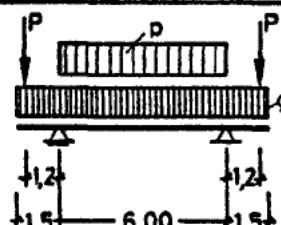
| Versuchs- bezeichnung | Statisches System und Belastungs- anordnung | Baustoffe | | |
|--------------------------|--|---------------------------------------|---|-------------------|
| | | Beton | Spannstahl | Betonstahl |
| VoV - 1 |  <p> $g = 5 \text{ kN/m}^2$ $P = 22,4 \text{ kN}$ </p> | B 45 $\beta_R = 27 \text{ N/mm}^2$ | Litze St1570/1770 $\phi 15,3 \text{ mm (0,6")}$ $A_z = 140 \text{ mm}^2$ | BSt 420/500 RK |
| VoV - 2 |  <p> $g = 5 \text{ kN/m}^2$ $P = 22,4 \text{ kN}$ $p = 10 \text{ kN/m}^2$ </p> | | zul $\sigma_z = 1239 \text{ N/mm}^2$ zul $V = 173,5 \text{ kN/Litze}$ | |

Tabelle 3.1: Statisches System, Belastung und Baustoffkennwerte für die Prüfkörper VoV-1 und VoV-2

Die Einzellasten P auf den Kragarmen wurden zur Einstellung der Stützmomente gebraucht, die sich unter Gebrauchslast beim 5-feldrigen Durchlaufsystem über den Innenstützen C und C' (s. Bild 3.1) ergaben. Während der Brandbeanspruchung wächst das Stützmoment infolge der im Auflagerbereich behinderten thermischen Verformung an, die Momente im Feldbereich werden reduziert.

Um diese Momentenumlagerung am statisch bestimmten Prüfkörper zu realisieren, wurden die Einzellasten P durch senkrecht angeordnete Spannelemente, die am Kragarm und im Prüfkammerboden befestigt waren, aufgebracht. Die Federcharakteristik der Abspannelemente wurde so bemessen, daß beim Raumtemperatur am Prüfkörper unter der Einzellast P annähernd die gleiche Durchbiegung entstand wie am 5-feldrigen Durchlaufsystem (s. Bild 3.2).

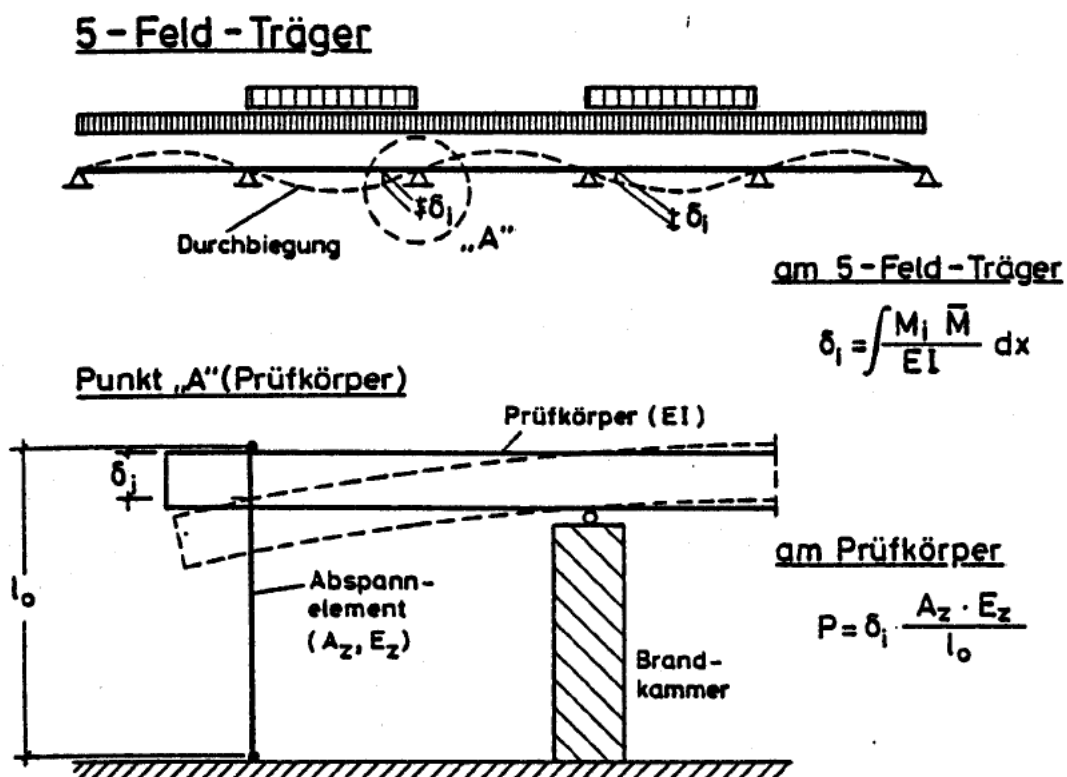


Bild 3.2: Abspannelement am Kragarm

Im Bild 3.3 ist die Höhenlage der Spannglieder dargestellt. Über den Auflagern wurden die Spannglieder kreisförmig, im Feldbereich parabelförmig verlegt.

Der seitliche Abstand zu den Plattenstreifenrändern betrug jeweils 30 cm. Die Betonüberdeckung in Feldmitte sowie über den Auflagern wurde entsprechend DIN 4102 Teil 4 [3] festgelegt. Für punktförmig gestützte Platten ohne Stützenkopfverstärkung werden als Mindestachsabstand (kleinster Abstand zwischen Längsachse des Bewehrungsstabes und der beflamten Beton-

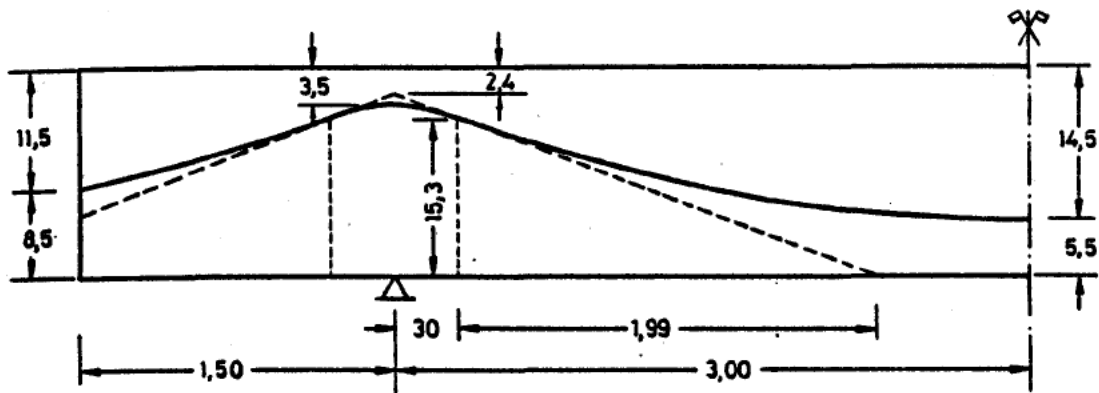


Bild 3.3: Spanngliedführung (Länge M 1 : 25, Höhe M 1 : 5)

oberfläche) für die Feldbewehrung 35 mm und für die Stützbewehrung 15 mm verlangt. Diese Werte gelten für eine kritische Temperatur von 500 °C. Bei Ausnutzung der nach DIN 4227 Teil 6 [1] unter Gebrauchslast zulässigen Spannstahlspannung von $\text{zul } \sigma_z = 0,7 \cdot \beta_z$ fällt die kritische Temperatur für kaltgezogenen Spannstahl St 1570/1770 auf $\text{crit } T = 300 \text{ °C}$ ab, so daß die Mindestachsabstände entsprechend Anhang B.2 von DIN 4102 Teil 4 [3] um $\Delta u = 20 \text{ mm}$ vergrößert werden müssen. In Tabelle 3.2 sind die erforderlichen Achsabstände der Spannbewehrung zusammengestellt.

| | $u \text{ [mm]}$ für $\text{crit } T = 500 \text{ °C}$ | $\Delta u \text{ [mm]}$ für $\text{crit } T = 300 \text{ °C}$ | vorh u [mm] |
|----------------|---|--|------------------|
| Feldbewehrung | 35 | 20 | 55 |
| Stützbewehrung | 15 | | 35 |

Tabelle 3.2: Achsabstände der Spannbewehrung

Bei Raumtemperatur tritt nur ein geringer Anstieg der Spanngliedkraft beim Übergang vom Gebrauchszustand zum rechnerischen Bruchzustand auf. Für die Bemessung bei Brandeinwirkung wurde näherungsweise von ähnlichen Verhältnissen ausgegangen und deshalb die zulässige Spannstahlspannung unter Gebrauchslast zur Festlegung der kritischen Temperatur benutzt. Diese Näherung ist nur

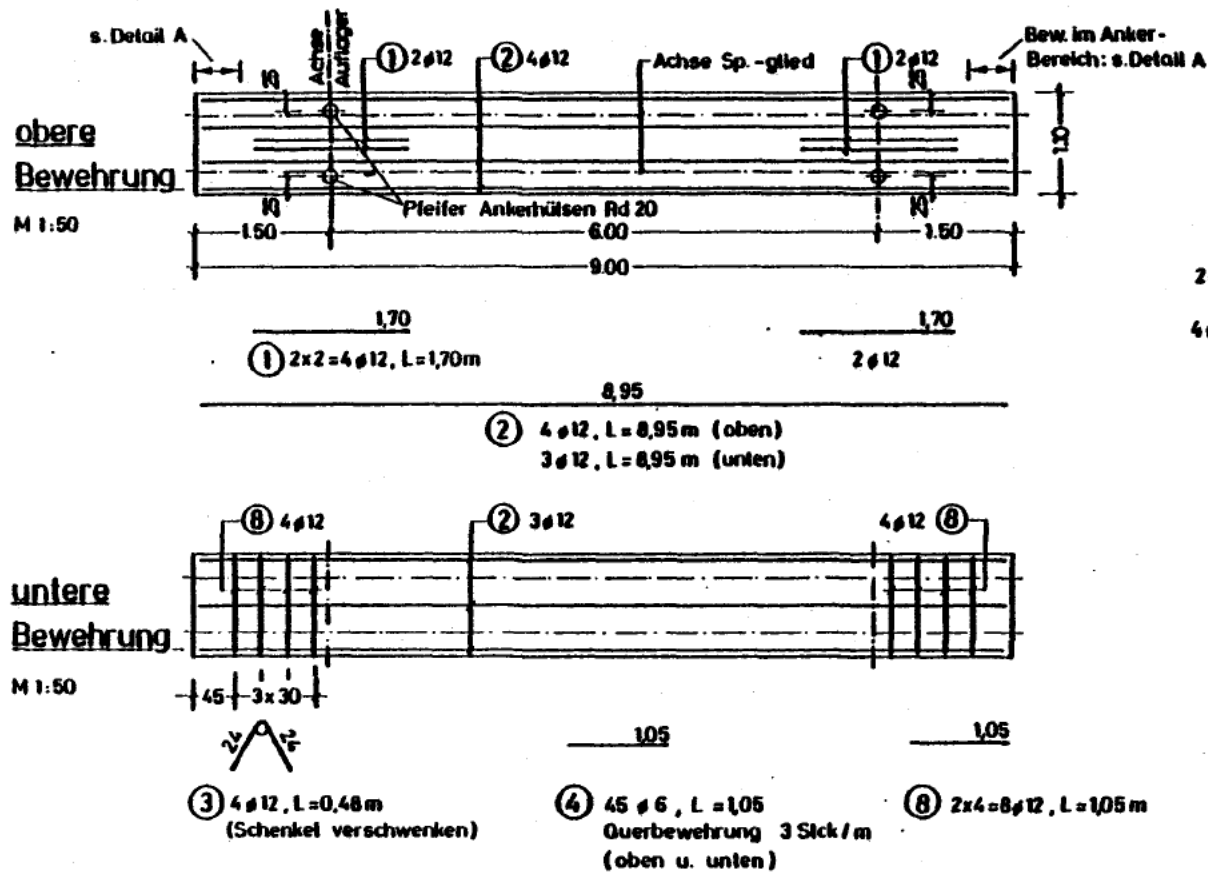
für Vorspannung ohne Verbund zulässig; für Vorspannung mit Verbund bei Raumtemperatur gilt als Kriterium für die Bruchsicherheit stets die Spanngliedkraft an der Streck- bzw. $R_{0,2}$ -Grenze des Spannstahls, und die zur Festlegung der kritischen Temperatur maßgebende Stahlspannung muß aus der Gegenüberstellung der Grenzzustände der Tragfähigkeit bei Normaltemperatur und bei Brandeinwirkung ermittelt werden [14].

Die Prüfkörper wurden ohne Vorspannung gelagert und nach dem Einbau auf dem Brandofen von einer Seite (Spannankerseite) vorgespannt. In den Prüfkörpern wurde die Spannkraft durch die im Zulassungsbescheid des Spannverfahrens [4] genannten Gußanker aufgenommen.

Für die Brandversuche wurde eine Vorspannkraft von 160 kN pro Spannglied angestrebt. Das entspricht einem Spannkraftverlust durch Schwinden und Kriechen gegenüber der zulässigen Vorspannkraft unter Gebrauchslast (zul $V_0 = 173,5$ kN) von annähernd 8 %.

Aus der Vorspannkraft von 160 kN errechnet sich ein zentrischer Vorspannungsanteil für die Prüfkörper von $- 1,45 \text{ N/mm}^2$. Entsprechend DIN 4227 Teil 6 [1] genügt für diesen Spannungswert ein Bewehrungsgehalt $\mu < 0,1 \%$, um keinen Nachweis zur Beschränkung der Rißbreite führen zu müssen. Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde der Bewehrungsanteil der schlaffen Bewehrung aber so hoch gewählt, daß die Prüfkörper ohne aufwendige konstruktive Maßnahmen auch im nicht vorgespannten Zustand transportiert werden konnten.

Die obere schlaffe Bewehrung im Feldbereich wurde zur Beschränkung der Rißbreite erforderlich, wenn die Verkehrslast streifenförmig nur in den angrenzenden Feldern wirkte. In Tabelle 3.3 sind die Bewehrungsgehalte im Feldbereich sowie die Anzahl und vorhandenen Bewehrungsstab-Durchmesser zusammengestellt. Aus dem Bild 3.4 ist die schlaffe Bewehrung im Stützenbereich und die erforderliche Bewehrung im Spannkrafteinleitungsbereich ersichtlich. Die Betonüberdeckung der schlaffen Längsbewehrung betrug $c = 1,5 \text{ cm}$.



Baustoffe B 45
BSI 420/500RK

Plattendicke 20cm

Detail A Bew. im Ankerbereich

M 1:12,5

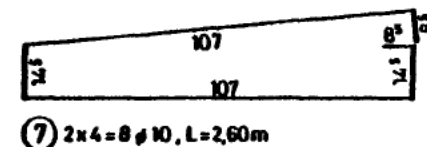
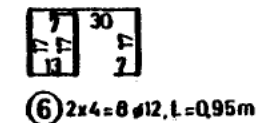
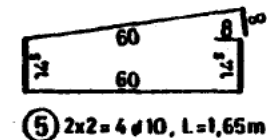
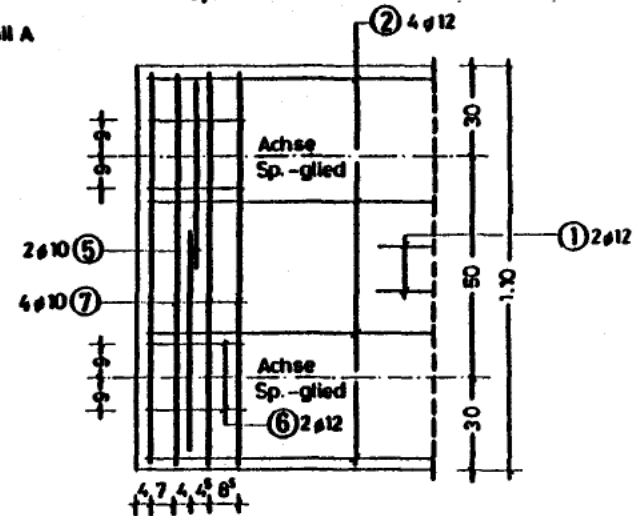


Bild 3.4: Bewehrungsplan für die schlaffe Bewehrung

| | Bewehrungsgehalt [%] | Anzahl und Durchmesser |
|-------|----------------------|------------------------|
| oben | 0,23 | 4 Ø 12 |
| unten | 0,17 | 3 Ø 12 |

Tabelle 3.3: Schlappe Bewehrung im Feldbereich

3.1.2 Baustoffe

Der Beton wurde für beide Plattenstreifen in einer Betonage werkmäßig hergestellt. Der Schalboden bestand aus Stahl, für die seitliche Schalung und die Schalung der Stirnflächen kamen glatte Betoplan-Schaltafeln zum Einsatz. Als Bindemittel wurde Portlandzement PZ 45 F benutzt.

Die Zuschläge bestanden zu 49 Gew.-% aus natürlich vorkommenden, überwiegend runden quarzitischen Grubensanden und Kiesen des Braunschweiger Raums sowie zu 51 Gew.-% aus Kalksteingries und Kalksteinsplitt des Harzvorlandes. Die Sieblinie wurde aus drei Fraktionen zusammengesetzt; sie verlief im Bereich 3 zwischen den Sieblinien A und B entsprechend Bild 3.5.

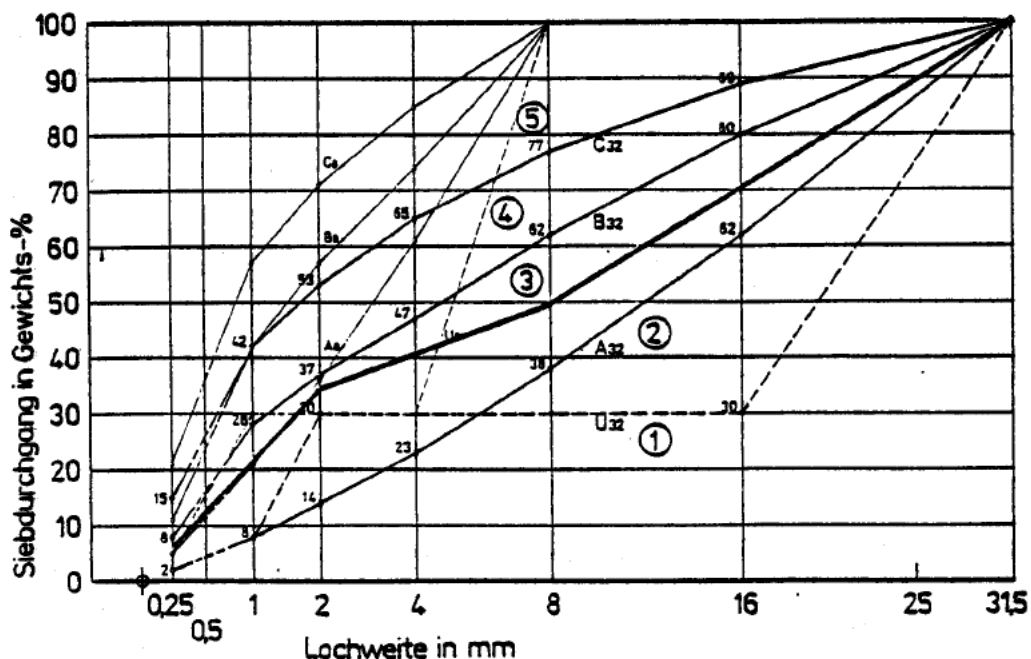


Bild 3.5: Sieblinie

Für beide Prüfkörper wurde die Betonfestigkeitsklasse B 45 angestrebt. Die Zusammensetzung des Frischbetons ist Tabelle 3.4 zu entnehmen.

| Zuschlag | mm | 0/2 | 2/8 | 8/32 |
|-------------------|-------|------|-----|------|
| | kg/m³ | 658 | 281 | 938 |
| Zement PZ 45 F | kg/m³ | 330 | | |
| Wasser | kg/m³ | 170 | | |
| W/Z-Wert | - | 0,52 | | |
| Ausbreitmaß | cm | 37 | | |
| Konsistenzbereich | - | K 2 | | |

Tabelle 3.4: Eigenschaften des Frischbetons

Zur Ermittlung der Betonfestigkeitsdaten und des Feuchtigkeitsgehalts wurden gleichzeitig mit den Prüfkörpern 6 Würfel mit der Kantenlänge 15 cm hergestellt. Davon wurden 3 Würfel nach DIN 1048 gelagert und im Alter von 28 Tagen zur Feststellung der Würfeldruckfestigkeit β_{w28} abgedrückt. Die restlichen 3 Würfel lagerten wie die Prüfkörper. Sie wurden an 4 umlaufenden Flächen mit Paraffin versiegelt, um eine annähernd bauteilgemäße Austrocknung während der Lagerung zu erreichen. Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung wurden die Würfel zur Ermittlung der Würfeldruckfestigkeit β_w geprüft. Aus den Trümmern wurden Proben aus verschiedenen Querschnittszonen zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts entnommen. Die ermittelten Druckfestigkeiten β_{w28} und β_w enthält Tabelle 3.5, angegeben sind die Mittelwerte aus jeweils drei Prüfungen.

| Alter [Tage] | Würfeldruckfestigkeit [N/mm²] | |
|-----------------|----------------------------------|----|
| 36 | $\sim \beta_{w28}$ | 58 |
| 222 | β_w | 58 |

Tabelle 3.5: Betonfestigkeiten (Würfel mit 15 cm Kantenlänge)

Die Prüfkörper wurden mit 7-drähtigen 0,6" Spanndrahtlitzen St 1570/1770 mit im Spannstahlwerk aufgebrachtem Korrosionsschutz vorgespannt. Angaben über den Korrosionsschutz befinden sich im Abschnitt 2, Tabelle 2.1. Für die Spanndrahtlitzen wurden an drei Proben die Zugfestigkeit, die $\beta_{0,01}$ -Grenze, die $\beta_{0,2}$ -Grenze, der Elastizitätsmodul und die Spannstahlquerschnittsfläche festgestellt. In Tabelle 3.6 sind die Mittelwerte der untersuchten Kenngrößen zusammengestellt.

| | | |
|------------------------|-------------------|------------------------|
| E-Modul | N/mm ² | 1,96 · 10 ⁵ |
| Querschnitt | mm ² | 138,53 |
| $\beta_{0,01}$ -Grenze | N/mm ² | 1484 |
| $\beta_{0,2}$ -Grenze | N/mm ² | 1778 |
| Zugfestigkeit | N/mm ² | 1900 |

Tabelle 3.6: Kennwerte des Spannstahls

Als schlaaffe Längsbewehrung wurde ausschließlich kaltverformter Betonstahl der Güte BSt 420/500 RK verwendet. Seine vorhandenen Festigkeits- und Querschnittswerte (Mittelwert aus 3 Proben) sind der Tabelle 3.7 zu entnehmen. Für die im Spannkrafteinleitungsbereich erforderliche Zusatzbewehrung sowie für die dort vorhandene Spaltzugbewehrung wurde nur die Festigkeitsklasse BSt 420/500, aber nicht die Stahlherstellung (U) oder (K), vorgeschrieben. Diese Bewehrung blieb während des Brandversuchs ohne Temperaturbeanspruchung und ließ damit keine Beeinflussung des Tragverhaltens erwarten. Von ihr wurden keine Festigkeitseigenschaften ermittelt.

| | | |
|-----------------------|-------------------|------------------------|
| E-Modul | N/mm ² | 2,08 · 10 ⁵ |
| Querschnitt | mm ² | 115 |
| $\beta_{0,2}$ -Grenze | N/mm ² | 428 |
| Zugfestigkeit | N/mm ² | 522 |

Tabelle 3.7: Kennwerte der schlaffen Längsbewehrung
BSt 420/500 RK, \emptyset 12

Die senkrechten Abspannelemente am Kragarm hatten die in Tabelle 3.8 zusammengestellten Materialkennwerte.

| | | VoV-1 | VoV-2 |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Stahlgüte | - | St 1470/1670 | St 1570/1770 |
| E-Modul | N/mm ² | $2,01 \cdot 10^5$ | $1,98 \cdot 10^5$ |
| Querschnitt | mm ² | 37,75 | 141,35 |
| Anzahl | - | 2 | 1 (Litze) |

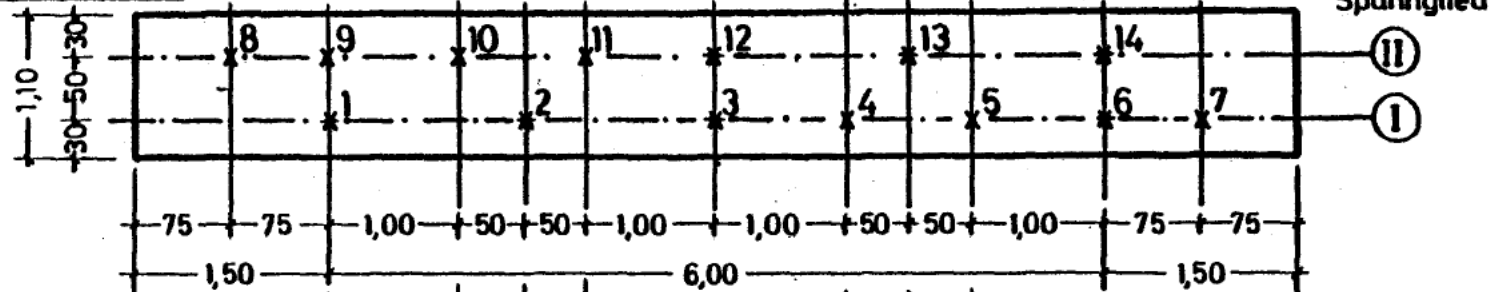
Tabelle 3.8: Kennwerte der Abspannelemente

3.1.3 Temperaturmeßquerschnitte

An die Vorspannbewehrung und an die schlaaffe Bewehrung wurden NiCr-Ni-Thermoelemente (Drahtdurchmesser 0,5 mm) zur Messung der Temperatur-Zeit-Verläufe appliziert. Die freien Drahtenden wurden zu Meßperlen verschweißt. Bei der Vorspannbewehrung wurden die Thermoelemente mit schmalen textilen Klebebändern am PE-Kunststoffmantel befestigt. Um eine Aussage über die Temperaturentwicklung an der Spanndrahtlitze machen zu können, wurde pro Meßstelle mindestens ein Thermoelement am oberen und unteren Scheitelpunkt des Kunststoffrohrs angeordnet; zusätzlich wurden bei einigen Meßstellen an den seitlichen Scheitelpunkten Thermoelemente angebracht. An der schlaffen Bewehrung wurden die Thermoelemente mit Wickeldraht \varnothing 0,65 mm befestigt. Hinter der Meßperle wurde der Thermodraht auf einer Länge von ca. 20 cm auf dem Kunststoffrohr bzw. dem Bewehrungsstab verlegt und dann bereichsweise zusammengefaßt und gebündelt an der nichtbeflammten Bauteiloberfläche aus dem Betonquerschnitt geführt. Die Lage und die Bezeichnung der Meßstellen ist den Bildern 3.6 und 3.7 zu entnehmen.

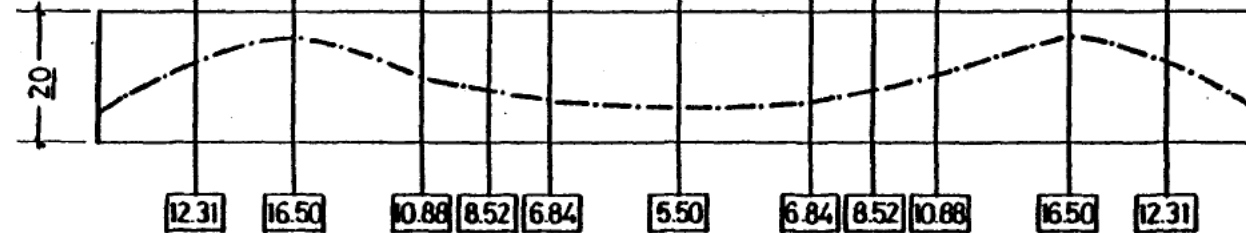
Beim Prüfkörper VoV-2 wurden die Seitenflächen mit 20 mm dickem Isoliermaterial bekleidet, um eine eindeutige Brandbeanspruchung von unten zu erreichen.

VoV - 1 Draufsicht



VoV-2

Ansicht



Abstand der Spanngliedachse von der Plattenunterseite

| Symbol | Lage der Meßperlen am Spannglied |
|--------|----------------------------------|
| x | |
| * | |

Bild 3.6: Lage und Bezeichnung der Temperaturmeßstellen an den Spanngliedern

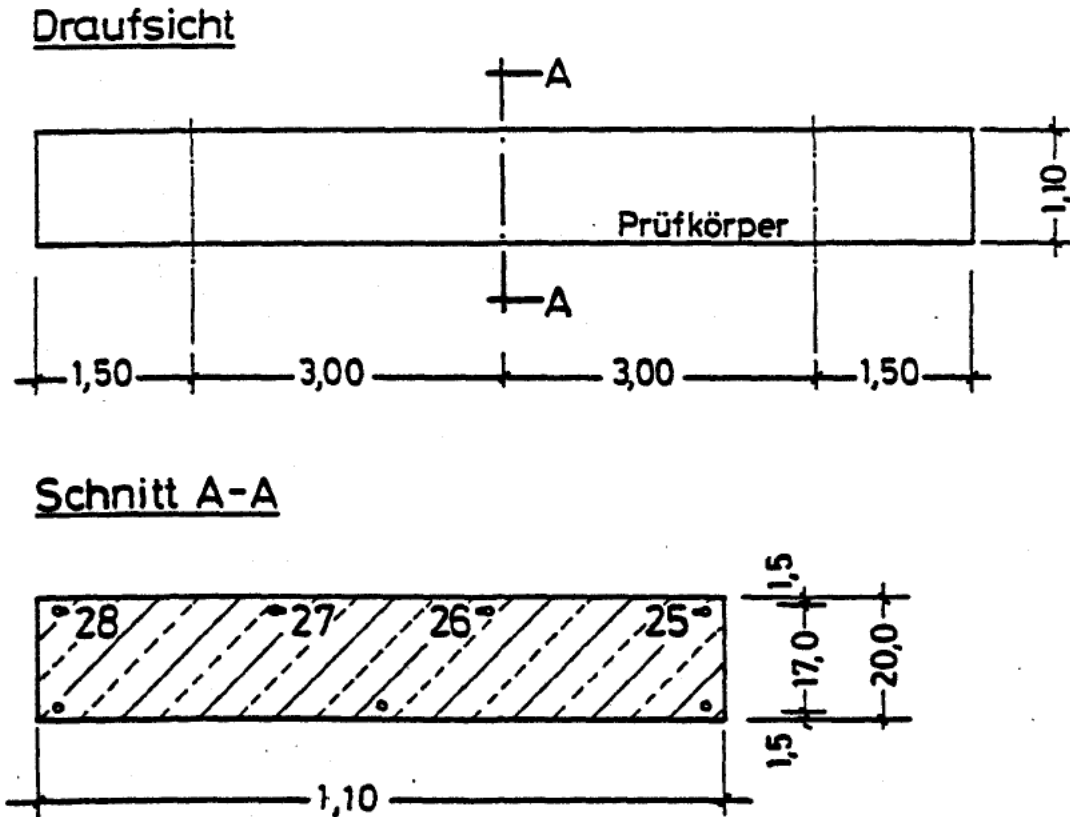


Bild 3.7: Lage und Bezeichnung der Temperaturmeßstellen an der schlaffen Bewehrung

3.1.4 Lagerung und Trocknung

Die Prüfkörper wurden nach der Herstellung im Fertigteilwerk drei Tage feucht gehalten, danach für einen Monat im Freien und anschließend in einer geschlossenen Halle gelagert, die annähernd das Normklima 20/65 aufwies. Die Lagerungszeit in der Halle betrug beim Prüfkörper VoV-1 mehr als 180 Tage und beim Prüfkörper VoV-2 mehr als 200 Tage. Damit überschritt sie die in DIN 4102 Teil 2 [15] geforderte Dauer von 100 Tagen, die eine ausreichende Austrocknungszeit gewährleistet.

3.2 Versuchsaufbau und -durchführung

3.2.1 Brandraum und Beheizung

Die Prüfkörper wurden als obere Abdeckung einer Brandkammer von 6,0 m Länge und 4,0 m Breite eingebaut. Die lichte Brandkammerhöhe betrug 1,40 m. Die Längswände und der Boden bestanden aus Hartschamotte, während die beiden Stirnwände ofenseitig mit Gasbetonsteinen bekleidet waren. Die nicht vom Prüfkörper überdeckte obere Brandkammeröffnung wurde durch Gasbetonplatten abgedeckt, die außen auf den Brandkammerlängswänden und innen auf dem Prüfkörper auflagen. Dadurch wurde erreicht, daß die Prüfkörperoberseite auch bei großen Durchbiegungen der Prüfkörper vor dem direkten Brandangriff geschützt waren.

Die Beheizung der Prüfkörper erfolgte durch je drei Ölbrenner an den beiden Längsseiten unter Verwendung von Heizöl EL nach DIN 51 603 und folgte der Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN 4102 Teil 2 [15] bzw. ISO 834 [16]. Die Flammenachsen verliefen horizontal, 0,60 m über dem Brandkammerboden, senkrecht zur Längsachse der Prüfkörper. Die Flammenlänge betrug im allgemeinen etwa 0,8 bis 1,0 m. Die Rauchgase wurden durch Abzüge am Boden des Brandraums abgesaugt. Im Bild 3.8 ist die Anordnung der Ölbrenner dargestellt.

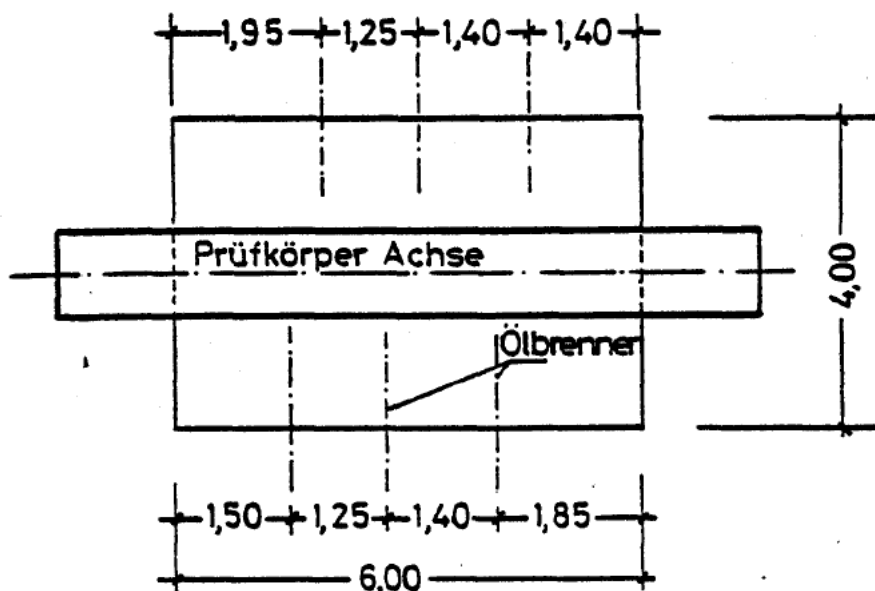


Bild 3.8: Anordnung der Ölbrenner

3.2.2 Einbau und Belastung der Prüfkörper

Die Prüfkörper wurden so eingebaut, daß von der Gesamtlänge die mittleren 6 m beflammt wurden, während die angrenzenden Kragarme von je 1,5 m Länge außerhalb des Brandraumes blieben. Beide Auflager waren gegen übermäßige Erwärmung durch Isolierung geschützt. Das eine Auflager wurde durch zwei Stahlplatten mit zwischenliegendem Vollrund (Rollenlager) als horizontal verschieblich ausgeführt, das andere galt durch ein zwischen den Stahlplatten liegendes Halbrund als horizontal annähernd unverschieblich. Aus den Bildern 3.9 und 3.10 sind die Auflagerausbildungen ersichtlich.



Bild 3.9: Horizontal verschiebliches Auflager (nach dem Brandversuch)

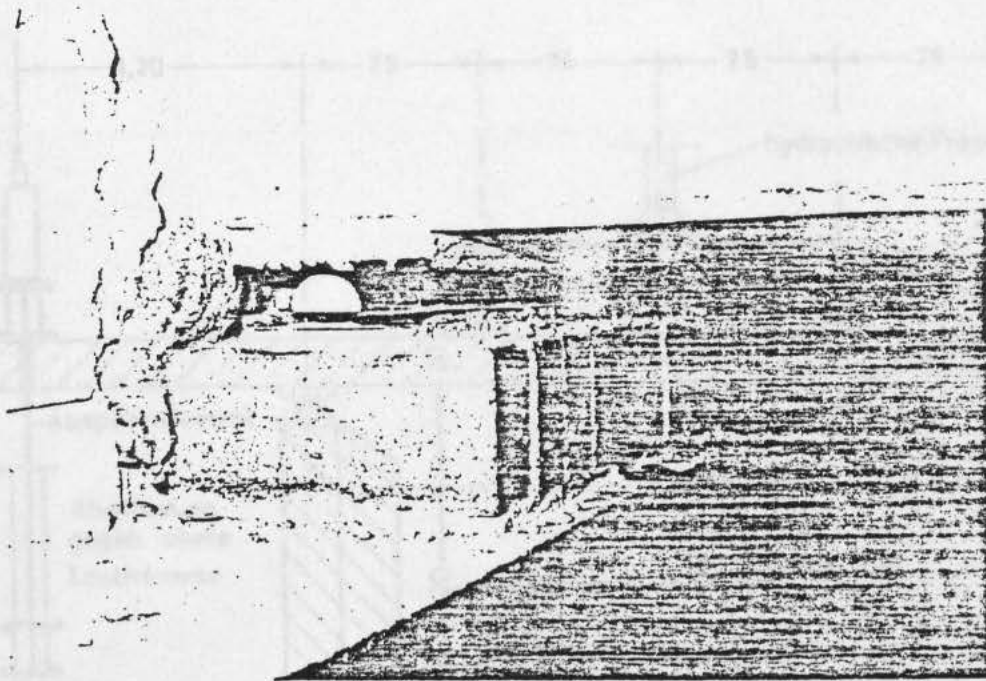


Bild 3.10: Horizontal unverschiebliches Auflager

Im zweiten Brandversuch (VoV-2) wurde die Verkehrslast im beflamnten Feld durch zwei hydraulische Pressen aufgebracht, die während der Branddauer die Belastung konstant hielten. Durch längsliegende Traversen wurden die Pressenkräfte auf vier Krafteinleitungsbereiche übertragen, in denen sie über querliegende Traversen auf die gesamte Plattenbreite verteilt in den Prüfkörper eingeleitet wurden. Im Bild 3.11 ist die Versuchsanordnung für den Brandversuch VoV-2 dargestellt; die Abstützung der Abspannelemente gegen die obere Lasttraverse ist dabei nur angedeutet. Im Brandversuch VoV-1 war das beflamnte Feld unbelastet (s. Tabelle 3.1).

Die Federtöpfe an den Stirnseiten der Prüfkörper bestanden aus jeweils 20 Tellerfedern, die in einem Hohlzylinder geführt wurden. Die Tellerfedern hatten einen Außendurchmesser von 200 mm, eine Dicke von 12 mm und eine Höhe im unbelasteten Zustand von 16,6 mm. Die Einzelteller wurden durch wechselseitiges Aneinanderreihen zu Federsäulen zusammengestellt. Zur Verminderung der Reibung wurde die Innenwandung des Hohlzylinders

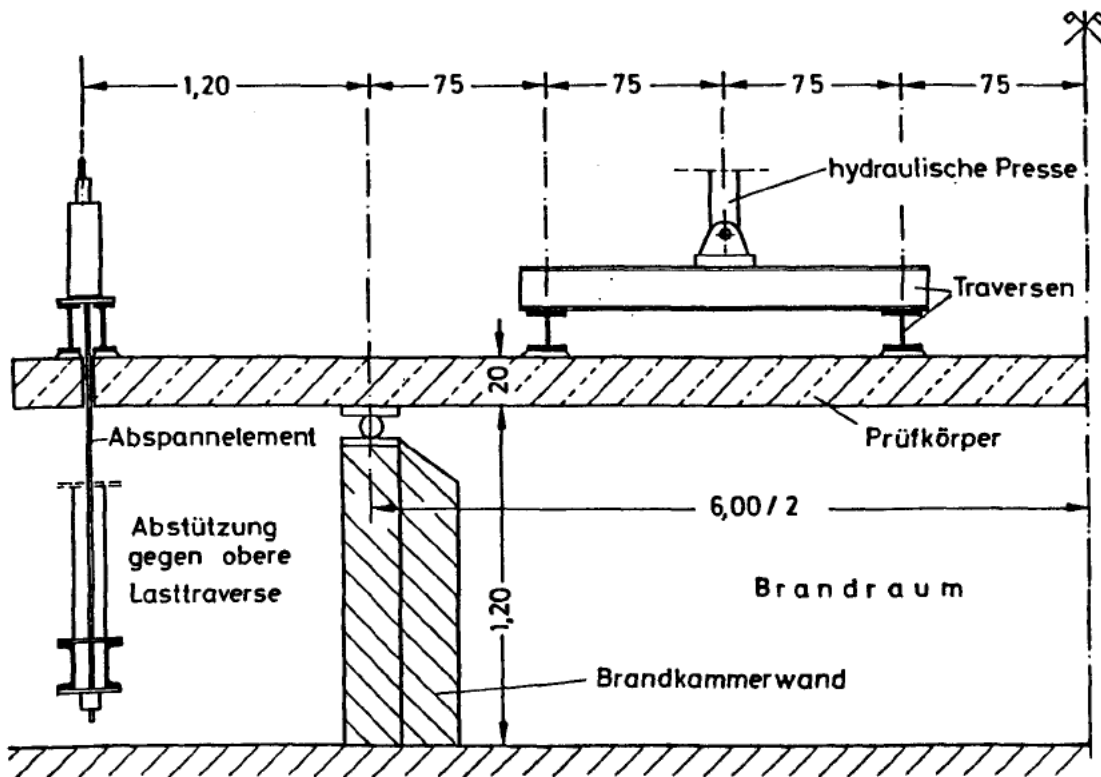


Bild 3.11: Versuchsanordnung für den Brandversuch VoV-2

mit Graphitfett geschmiert. Zum Ausrichten und Einfedern der einzelnen Tellerfedern wurden die Federsäulen vor dem Einbau am Prüfkörper in zwei Belastungszyklen bis 170 kN vorgespannt. Danach wurden sie im ausgerichteten Zustand an die Prüfkörper montiert. Die Ergebnisse der zwei Belastungszyklen sind als Kraft-Weg-Diagramm im Bild 3.12 dargestellt; das Streuband schließt die größten und kleinsten gemessenen Federwege ein. Bei der Federkraft $F = 160 \text{ kN}$ entspricht die Federrate der Federsäule $R = 2,7 \text{ kN/mm}$ annähernd der bezogenen Spannstahldehnsteifigkeit der durch den Prüfkörper nicht "realisierten" Felder des 5-feldrigen Durchlaufsystems:

$$\overline{EF} = (A_z \cdot E_z) / L_o \approx 2,6 \text{ kN/mm}.$$

Bild 3.13 zeigt ergänzend konstruktive Details zum Federtopf mit Federsäule, Führungszylinder und Auflagerscheiben; von den 20 Einzelfedern sind nur die ersten zwei und die letzten zwei Tellerfedern dargestellt.

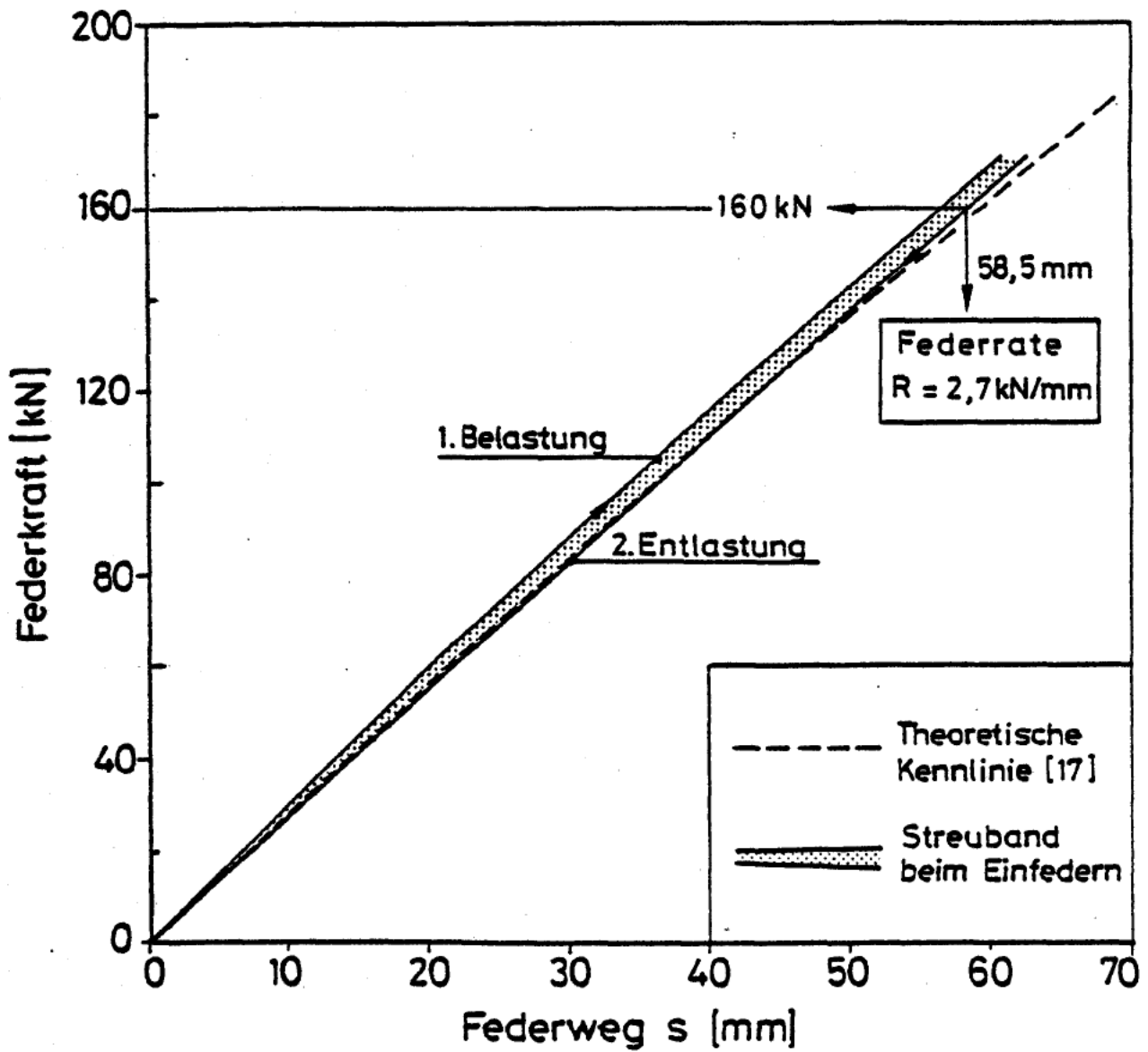


Bild 3.12: Kennlinien der Federsäulen

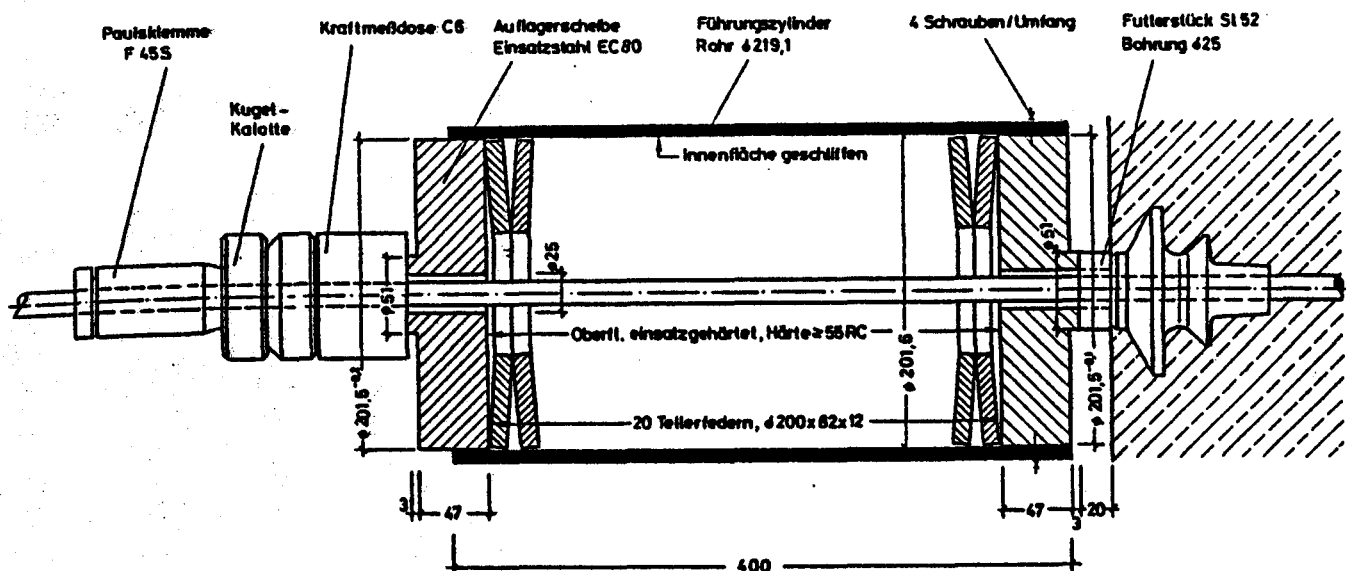


Bild 3.13: Federtopf

Nach dem Einbau der Prüfkörper auf der Brandkammer wurden die senkrechten Abspannelemente an den Kragarmen mit einer geringen Vorlast montiert. Danach erfolgte das Vorspannen der Spannglieder. Beim Brandversuch VoV-1 - ohne Verkehrslast im brandbeanspruchten Feld - wurden die Abspannelemente nach Abschluß der Vorspannung mit ihrer Soll-Zugkraft belastet.

Beim zweiten Brandversuch VoV-2 wurde die Verkehrslast im brandbeanspruchten Feld nach Abschluß der Vorspannung zusammen mit den Zugkräften in den Abspannelementen aufgebracht. Die Vorspannkräfte nach Erreichen der Sollwerte von Verkehrslast und Zugkräften sind in Tabelle 3.8 aufgeführt.

Beim Lösen des Spannstabs von der Spannpresse wurden die als Keilverankerungen ausgebildeten Verankerungselemente beansprucht. Die Keile waren vor dem Umsetzen der Spannkraft durch Hammerschläge an den gespannten Stab angedrückt; während der Verankerung glitten (schlupften) die Keile, bis die Spannkraft durch die klemmende Keilwirkung vom Verankerungselement getragen wurde. Ein Teil der Spannkraft ging durch den Schlupf verloren. Dadurch entstanden Unterschiede in der Spannkraft zwischen der Festanker- und der Spannankerseite sowie zwischen Spannglied I und Spannglied II. Auf eine Korrektur der Vorspannkräfte durch erneutes Anspannen wurde verzichtet, um mehrfache Verletzungen am Spannstahl infolge der scharfkantigen Keilflächen zu vermeiden. In

der Tabelle 3.9 sind die vor den Brandversuchen gemessenen Vorspannkkräfte in den Prüfkörpern VoV-1 und VoV-2 zusammengestellt.

| Vers. - Bez. | Spann - glied | Vorspannkraft [kN] | | mittlere Vor - spannkraft [kN] | Ausnutzungsgrad vorh σ_z / β_z (nach Tab. 3.1) |
|--------------|---------------|--------------------|-----------|--------------------------------|---|
| VoV - 1 | I | Spannanker | Festanker | 159,6 | 0,644 |
| | II | 157,4 | 159,9 | 158,7 | 0,640 |
| VoV - 2 | I | 161,3 | 164,3 | 162,8 | 0,657 |
| | II | 157,9 | 165,2 | 161,6 | 0,652 |

Tabelle 3.9: Vorspannkkräfte vor den Brandversuchen

Die senkrechten Abspannelemente an den Kragarmen (s. Bild 3.2) bewirkten eine elastische Rotationsbehinderung des Auflagerbereichs und ermöglichten damit während des Brandversuchs eine annähernd dem mehrfeldrigen Durchlaufsystem entsprechende Momentenumlagerung zwischen Auflager- und Feldbereich. Der Einsatz von konstanten Pressenkräften schied aus, weil dadurch die Momentenbeanspruchung während des Brandversuchs im Feldbereich über- und im Auflagerbereich unterschätzt wird. Ebenso war die Vorgabe von weg- oder kraftgesteuerten Pressenänderungen während des Brandversuchs nicht möglich, weil dafür abgesicherte Berechnungsgrundlagen fehlten. Um die Abspannelemente mit vertretbarem wirtschaftlichen und konstruktiven Aufwand herstellen zu können, wurden für sie handelsübliche Spannstähle verwendet. Damit wurde in Kauf genommen, daß die vorhandene Federzahl von der rechnerisch erforderlichen Federzahl abwich und der Schnittgrößen- und Verfor-

mungsverlauf des als Modell vorgegebenen 5-feldrigen Durchlaufsystems mit Abweichungen auf den Prüfkörper übertragen wurde. Diese Abweichungen erschienen vertretbar, weil auch der 5-feldrige Durchlaufträger als Ausschnitt aus einer 5 x 5 Felder großen Flachdecke Modellcharakter besaß (s. Bild 3.1). Für die Fragestellungen dieses Forschungsvorhabens interessierten hauptsächlich die Veränderungen der Kraft- und Verformungsgrößen während der Brandbeanspruchung sowie der Vergleich der Meßwerte von Versuch VoV-1 und VoV-2. Aus der Tabelle 3.10 sind die Abweichungen zwischen den nach der Bemessung erforderlichen und den vorhandenen Werten für die Federzahl und die Zugkraft der Abspannelemente zu ersehen. Den vorhandenen Werten liegen die Materialkennwerte von Abschnitt 3.1.2 zugrunde.

| Vers. Bez. | Federzahl R [kN/mm] | | Zugkraft [kN] | |
|---------------|------------------------|--------|------------------------|-------------------------|
| | erf. nach Bemessung | vorh R | erf. nach Bemessung | vorh. nach Belastung |
| VoV-1 | 8,9 | 10,4 | 22,4 | 27,5 |
| VoV-2 | 15,5 | 18,7 | 22,4 | 26,7 |

Tabelle 3.10: Federzahl und Zugkraft der Abspannelemente

3.2.3 Meßprogramm

Das Meßprogramm umfaßte die Aufnahme von Temperaturen, Kräften und Verformungen während des Brandversuchs. Die Meßwerte wurden im Abstand von zwei Minuten auf eine Magnetkassette übertragen und zusätzlich auf einem Papiermitschrieb ausgegeben. Die Aufzeichnungen auf der Magnetkassette wurden nach Versuchsende zur rechnergestützten Datenauswertung benutzt. Im Bild 3.14 ist die elektronische Meßwerterfassungsanlage mit Rechner, Diskettenstationen und Monitor zu erkennen.

Neben der elektronischen Meßwerterfassungsanlage wurde ein Kompensograph mit angeschlossenem 12-Kanal-Punktdrucker zur Aufzeichnung der Brandraumtemperaturen eingesetzt.

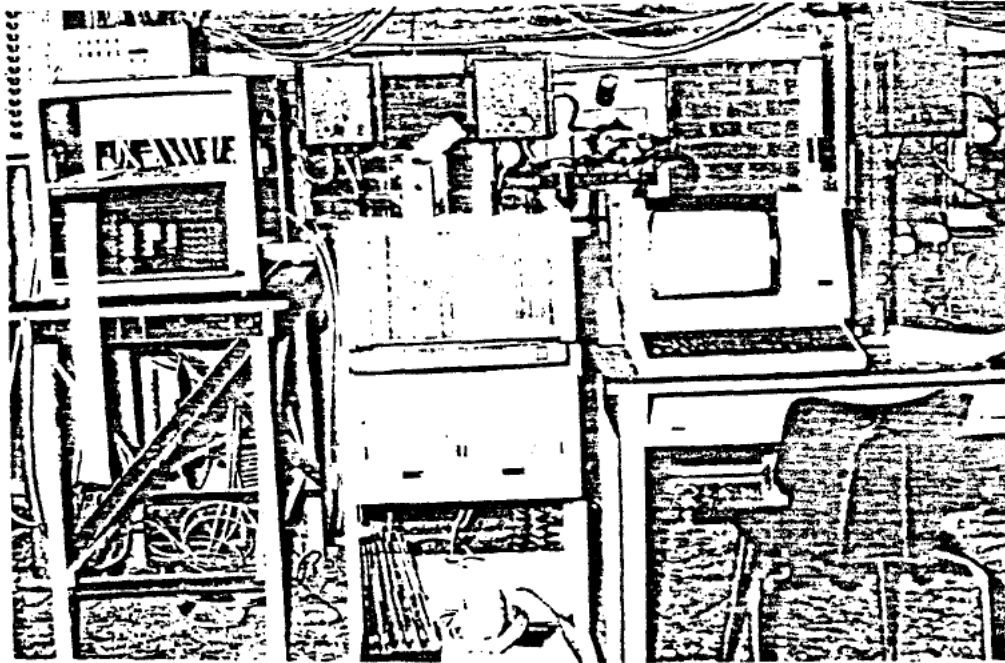


Bild 3.14: Elektronische Meßwerterfassung

3.2.3.1 Messung der Brandraumtemperaturen

Mit NiCr-Ni-Thermoelementen ($\varnothing 3 \text{ mm}$) wurde an 6 Meßstellen die Brandraumtemperatur kontrolliert, wobei die Meßwerte gleichzeitig zur Steuerung der Einheits-Temperaturzeitkurve dienten. Aus Bild 3.15 ist die Lage der Meßstellen zu ersehen.

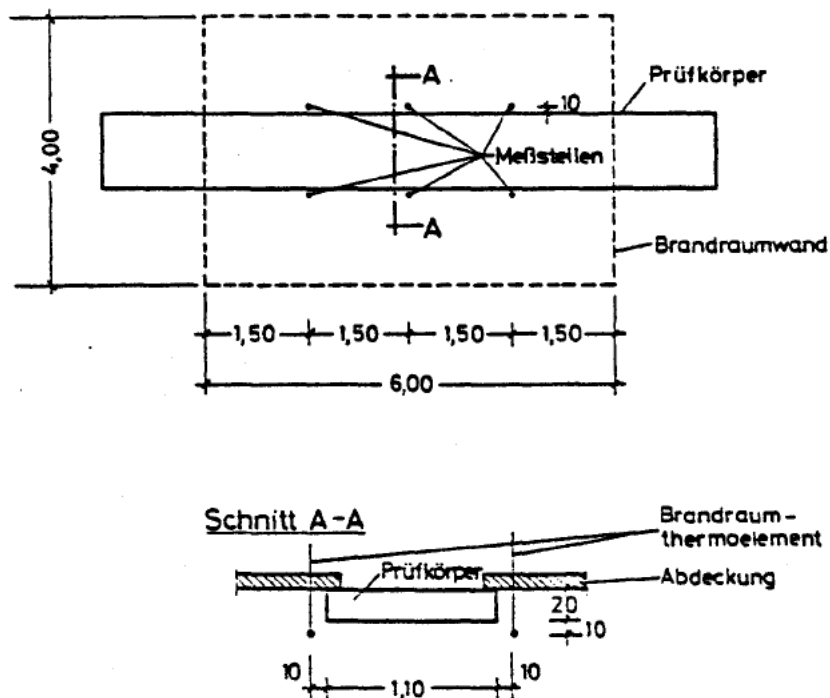


Bild 3.15: Lage der Brandraumthermoelemente

3.2.3.2 Messung der Temperatur der Spannglieder und der schlaffen Bewehrung

Die Temperatur der Spannglieder und der schlaffen Bewehrung wurde mit NiCr-Ni-Thermoelementen gemessen. Im Abschnitt 3.1.3 ist die Lage der Meßstellen im Betonquerschnitt sowie ihre Bezeichnung angegeben (Bild 3.6 und 3.7).

3.2.3.3 Messung der Vorspannkraft

Die Veränderung der Vorspannkraft wurde durch Ringkraftmeßdosen registriert, die an jeder Stirnseite des Prüfkörpers zwischen Federtopf und Spanngliedverankerung angeordnet waren (Bild 3.13). Im Bild 3.16 sind zwei am Prüfkörper montierte Federtöpfe mit Ringkraftmeßdose und Spanngliedverankerung nach Aufbringen der Vorspannung zu erkennen.

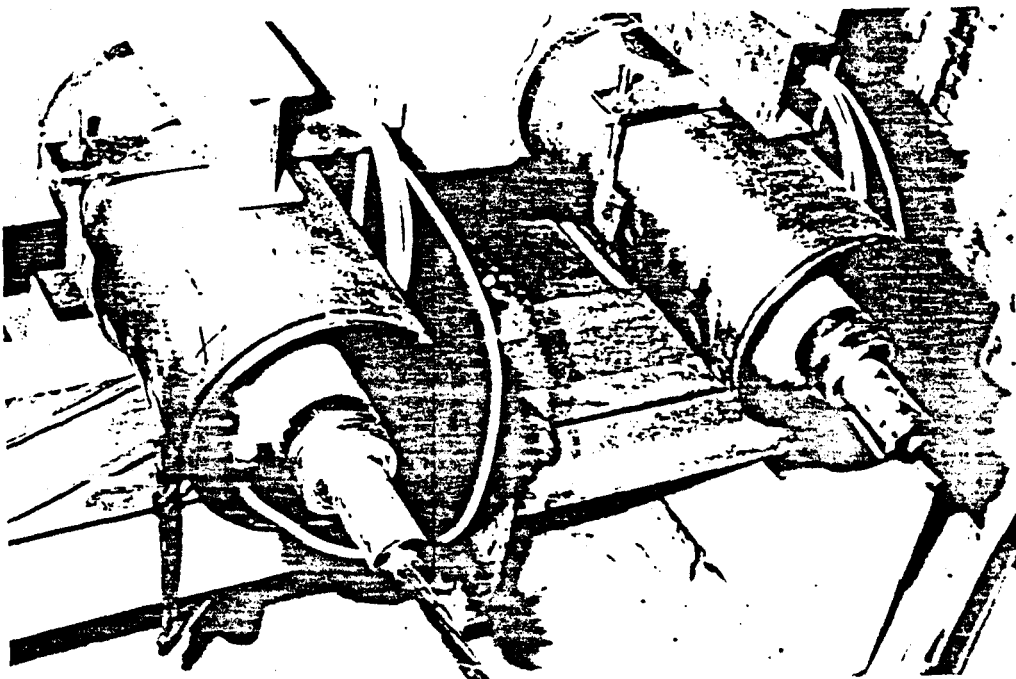


Bild 3.16: Federtöpfe mit Ringkraftmeßdose und Spanngliedverankerung im vorgespannten Zustand

3.2.3.4 Messung der Zugkraft im Abspannelement

Die Zugkraft in den Abspannelementen wurde indirekt durch Dehnmeßstreifen gemessen, die in halber Höhe auf die Abspannelemente appliziert waren. Im Versuch VoV-1 wurden pro Abspannelement (2 \emptyset 7) zwei Dehnmeßstreifen und im Versuch VoV-2 pro Abspannelement (1 Litze 0,6") sechs Dehnmeßstreifen angebracht. Zur Berechnung der Zugkräfte aus den gemessenen Dehnungen wurden die Materialkennwerte aus Abschnitt 3.1.2, Tabelle 3.8 benutzt.

Auf der Spannankerseite der Prüfkörper wurde die Zugkraft zusätzlich durch eine Ringkraftmeßdose aufgenommen.

3.2.3.5 Messung der Prüfkörperverformung

Mit Hilfe feiner Stahldrähte, die von der jeweiligen Meßstelle zu Drehpotentiometern mit Seilrollen für 400 mm maximalen Weg liefen, wurden die Verformungen der Prüfkörper gemessen.

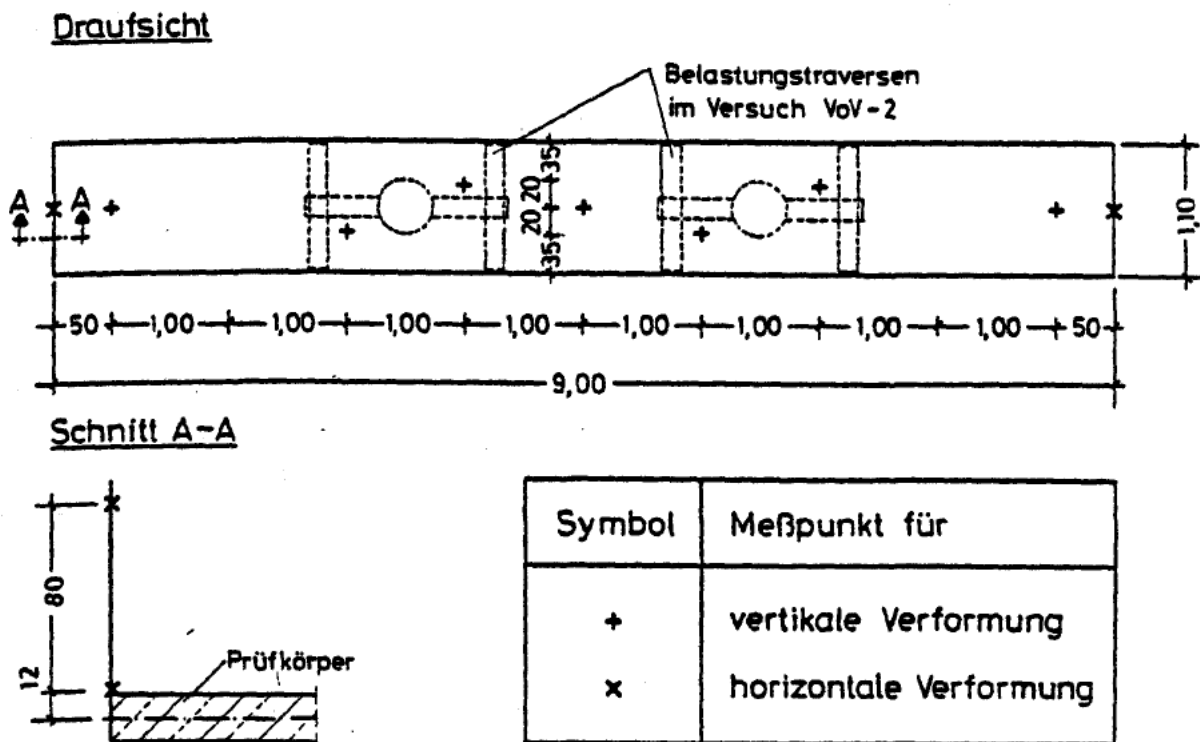


Bild 3.17: Anordnung der Meßstellen für die Verformungsmessungen

Die horizontalen Verformungen wurden an den Stirnseiten der Prüfkörper an zwei übereinanderliegenden Punkten aufgenommen. Aus den Ergebnissen wurde die Verdrehung des Kragarmendes errechnet. Die Lage der Meßstellen ist Bild 3.17 zu entnehmen.

Bei jedem Prüfkörper wurde an 7 Stellen die vertikale Verformung gemessen. 5 Meßstellen lagen im Bereich des beflamnten Feldes, und je eine Meßstelle lag auf dem Kragarm. Die Lage der Meßstellen geht aus Bild 3.17 hervor.

3.2.4 Sonstige Beobachtungen

Während der gesamten Branddauer wurde das Verhalten der Prüfkörper augenscheinlich beobachtet und protokolliert. Ergänzend zu den Beobachtungen an der nichtbeflammten, zugänglichen Bauteiloberseite wurde die beflammte Bauteilunterseite durch Fenster in den Brandkammerwänden auf Feuchtigkeitsaustritt, eventuelle Abplatzungen und Rißbildung hin beobachtet.

3.3 Versuchsergebnisse

3.3.1 Brandraumtemperatur

In beiden Brandversuchen wurde die Einheits-Temperaturzeitkurve gemäß DIN 4102 Teil 2 [15] im zulässigen Toleranzbereich eingehalten. Die Meßwerte sind in den Anlagen 6 und 7 dargestellt.

3.3.2 Feuchtigkeitsgehalt der Prüfkörper

Zum Zeitpunkt der Brandversuche wurden 3 Betonproben in einem Trockenofen bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Auf das Trockengewicht bezogen, ergaben sich Restfeuchtigkeiten in der Größenordnung von 4 % bis 5 %.

3.3.3 Temperatur der Spannglieder

Im folgenden werden nur charakteristische Ergebnisse dargestellt. Weitere Meßergebnisse sind in den Anlagen 8 bis 12 zusammengestellt.

Im Abschnitt 3.1.3 wird erläutert, daß zu jeder Temperaturmeßstelle mehrere Thermoelemente (Meßpunkte) gehörten, die in den Scheitelpunkten des Kunststoffrohrs befestigt waren.

Die Temperatur-Zeit-Verläufe von vier Meßpunkten (MP 17 - 20), die zur Meßstelle 3 (MSt 3) in Feldmitte vom Prüfkörper VoV-2 gehörten, sind im Bild 3.18 aufgezeichnet. Für diese Meßstelle wurde die größte Temperaturdifferenz zwischen dem oben- und dem untenliegenden Meßpunkt gemessen. Das Spannglied hatte in Feldmitte (MSt 3) den kleinsten Abstand zur beflamten Bauteiloberfläche und lag damit im Bereich des oberflächennahen, hohen Temperaturgradienten. Neben den Temperatur-Zeit-Verläufen der Meßpunkte ist im Bild 3.18 der durch lineare Interpolation aus den Meßpunkttemperaturen errechnete Temperaturverlauf für den Spannstahl (MSt 3) als strichlierter Linienzug dargestellt; seine Abweichungen gegenüber den mittleren Meßpunkttemperaturen MP 18 und MP 19 sind gering. Die Berechnung der Stahltemperatur aus den umgebenden Meßpunkttemperaturen entspricht den in [18] für baupraktisch übliche Bewehrungsprozentsätze und in [19] für Spannglieder in Hüllrohren empfohlenen Verfahren, die Stahltemperatur aus den umliegenden Betontemperaturen zu ermitteln.

Im Bild 3.19 ist die zeitliche Temperaturentwicklung für alle Meßstellen des Prüfkörpers VoV-2 aufgezeichnet; der dunkel angelegte Bereich faßt die Temperaturentwicklung von Meßstellen zusammen, die symmetrisch zur halben Prüfkörperlänge angeordnet waren.

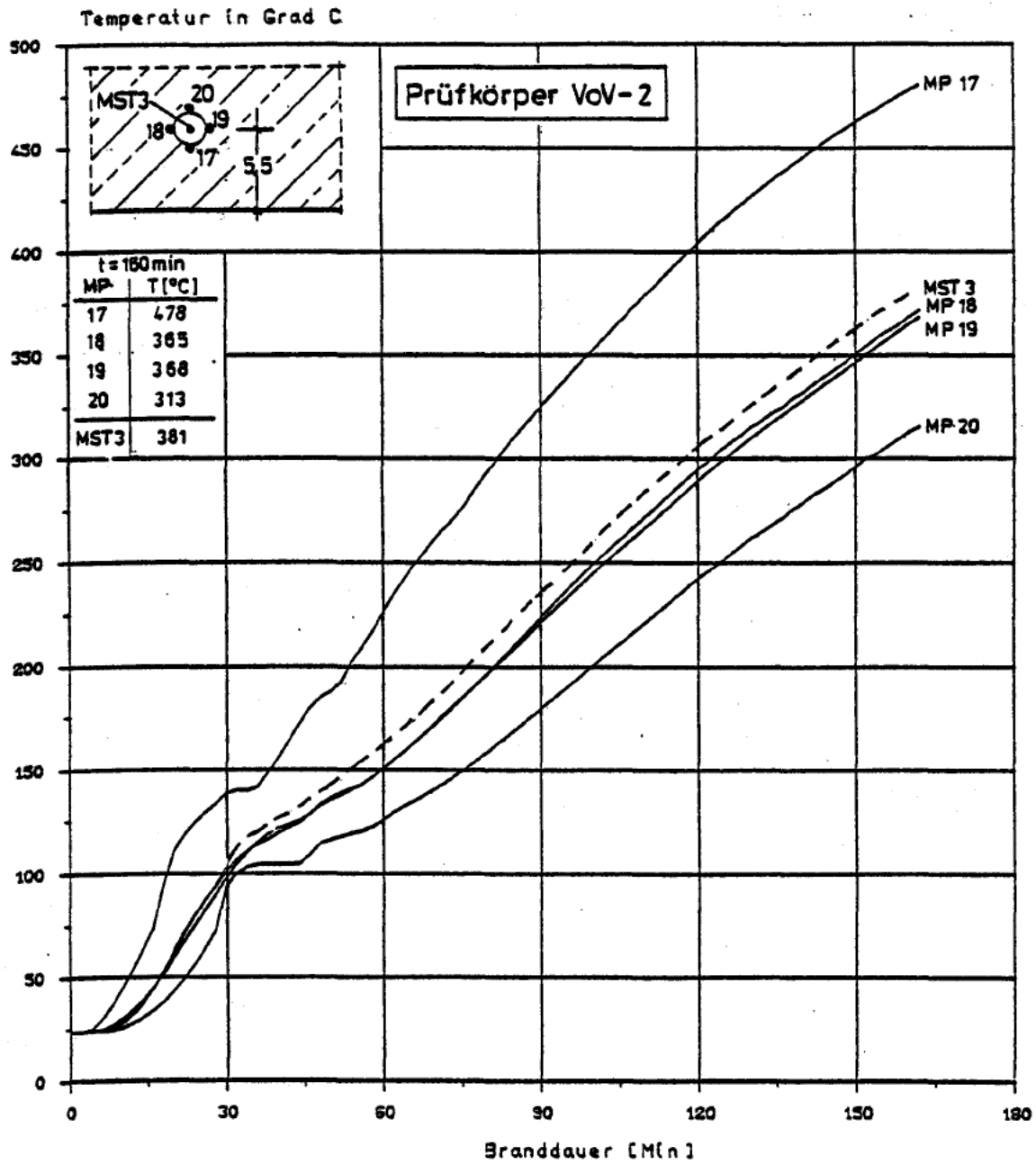


Bild 3.18: Temperaturentwicklung an den Meßpunkten am Kunststoffrohr und der berechnete Temperaturverlauf am Stahl

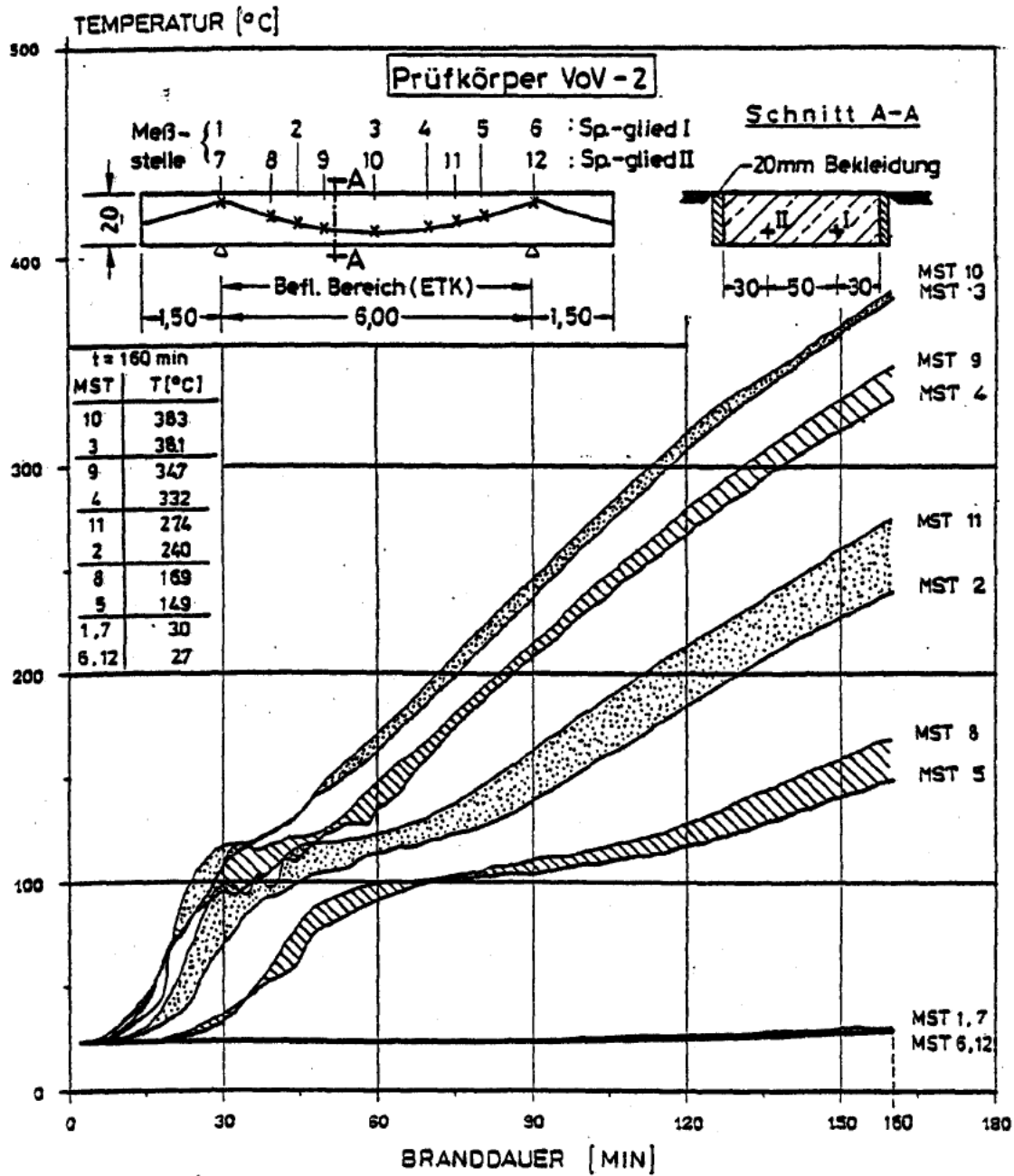


Bild 3.19: Temperatur-Zeit-Verläufe an den Spannstahl-Meßstellen des Prüfkörpers VoV-2

Infolge der variablen Höhenlage der Spannglieder zwischen den Auflagern erwärmen sich die Spannglieder in Feldmitte, wo sie den geringsten Abstand zur beflamten Bauteiloberfläche besaßen, am schnellsten. Es bildete sich ein deutlicher Temperaturgradient über die Spanngliedachse aus. Das gemessene Temperaturprofil ist für einige Branddauern im Bild 3.20 dargestellt.

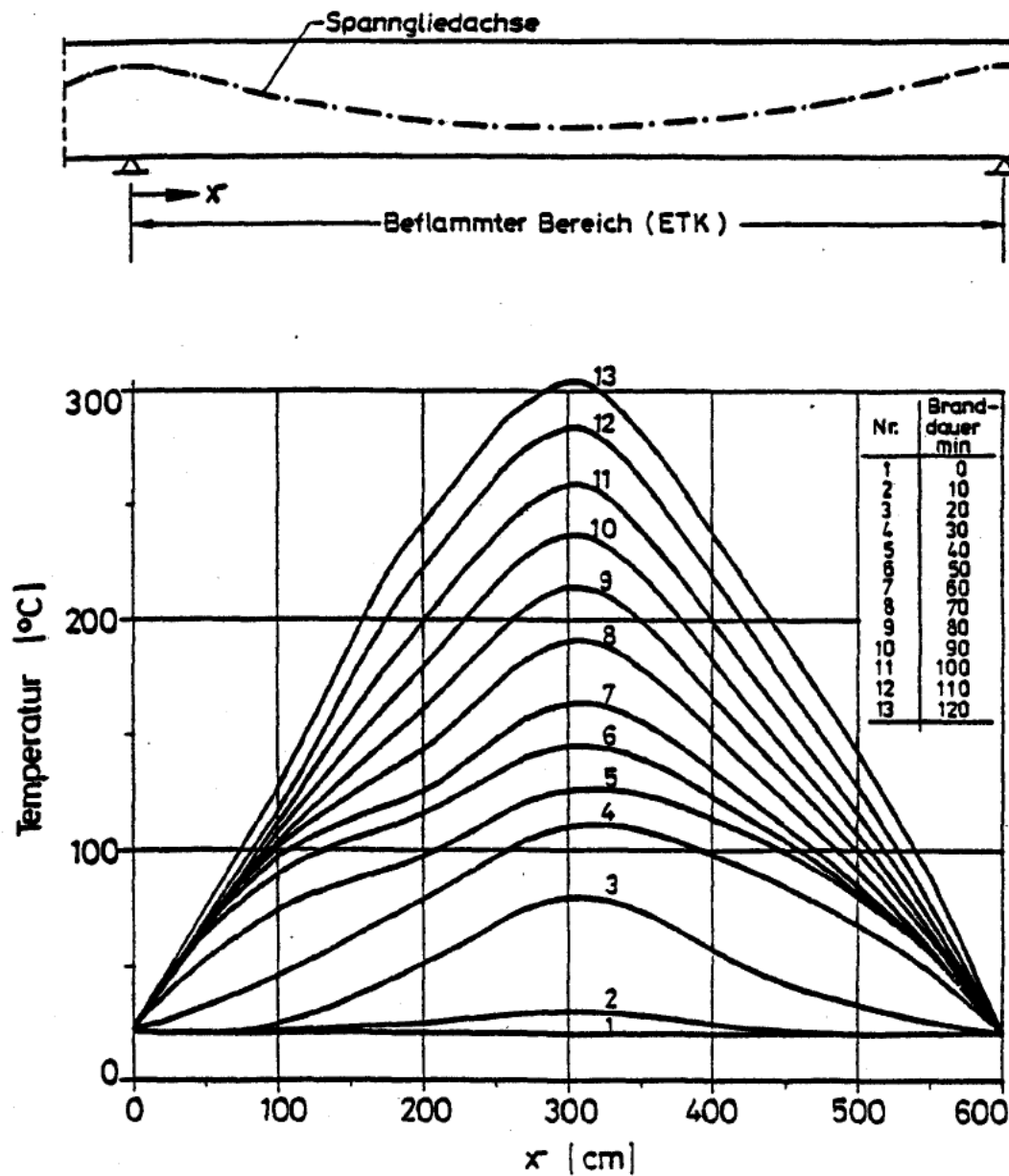


Bild 3.20: Temperaturprofil im Spannstahl, Prüfkörper VoV-1

3.3.4 Temperatur der schlaffen Bewehrung

Die Temperaturverläufe an der obenliegenden schlaffen Bewehrung in Feldmitte sind auf der Anlage 13 dargestellt. Die maximale Temperatur erreichte im Prüfkörper VoV-1 nach 120 Minuten Versuchsdauer fast 250 °C, während sie im Prüfkörper VoV-2 nach 160 Minuten Branddauer noch kleiner als 150 °C war. Der relativ starke Temperaturanstieg im Prüfkörper VoV-1 ist vermutlich dadurch zu erklären, daß die Meßstelle beim Betonieren aus ihrer ursprünglichen Lage ins Querschnittsinnere verrückt wurde.

3.3.5 Prüfkörper VoV-1

3.3.5.1 Vorspannkräfte

Im Bild 3.21 sind die Veränderungen der Vorspannkräfte während des Brandversuchs dargestellt. Die Kraftmeßdose am Spannanker vom Spannglied I (SA I) wurde infolge einer Fehlschaltung erst zur 20. Versuchsminute aktiviert.

Die Meßwertverläufe lassen sich in 5 typische Abschnitte unterteilen.

Während der ersten 8 Minuten der Brandbeanspruchung wurden keine Spannkräfteveränderungen registriert, danach stiegen die Spannkräfte innerhalb von 7 Minuten um ca. 6 kN an. Im 3. Abschnitt zwischen der 15. und 37. Minute verlangsamte sich die Spannkraftzunahme auf insgesamt 7 bis 8,5 kN. Die Vorspannkräfte blieben dann bis zu einer Versuchsdauer von 70 bis 84 Minuten annähernd konstant und fielen danach bis zum Versuchsabbruch in der 125. Minute fast linear ab.

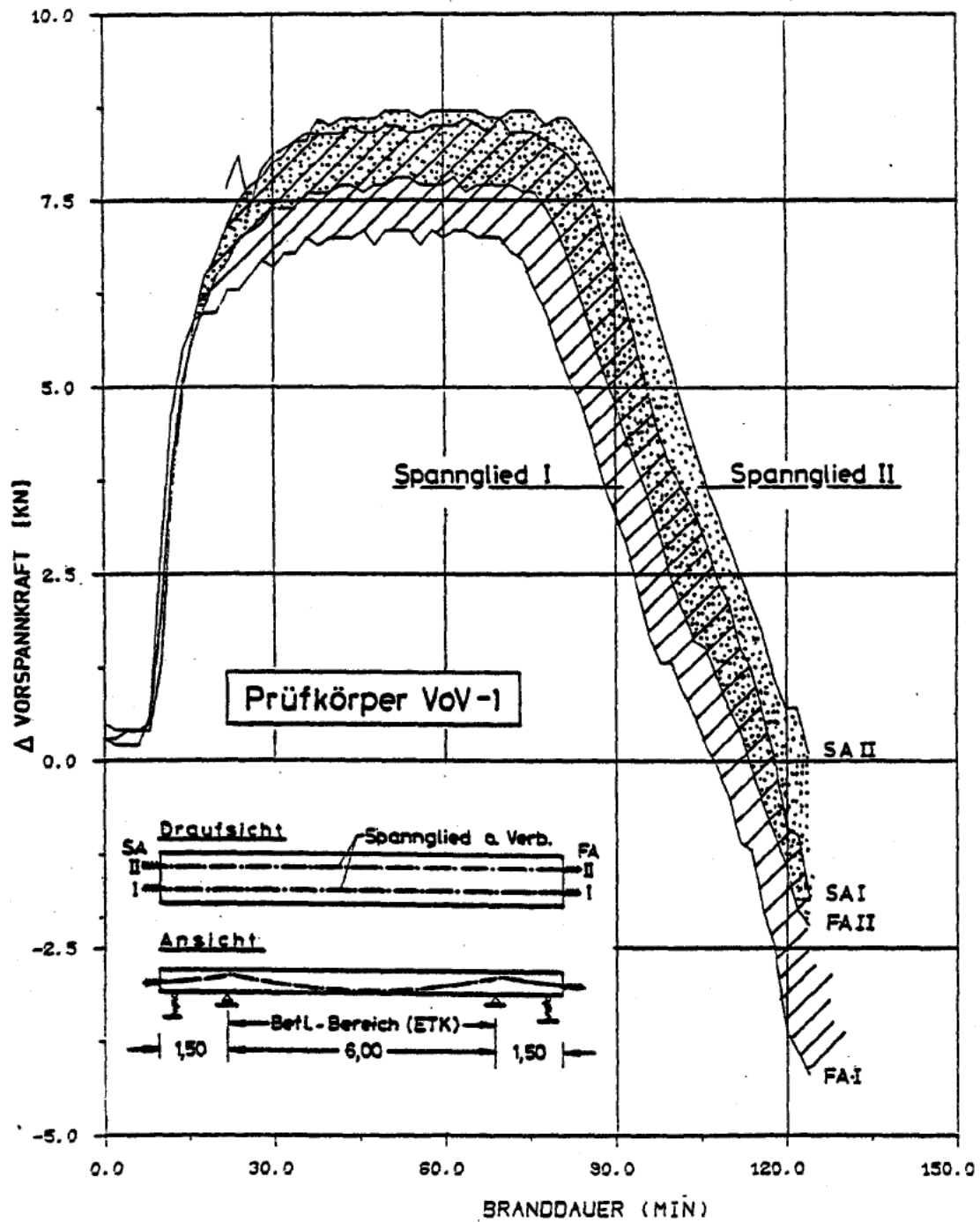


Bild 3.21: Veränderung der Vorspannkraft im Prüfkörper VoV-1 während der Brandbeanspruchung

3.3.5.2 Zugkräfte in den Abspannelementen

Die Veränderung der Zugkraft in den Abspannelementen wurde indirekt über Dehnmeßstreifen sowie an der Spannankerseite (SA) zusätzlich über eine Ringkraftmeßdose gemessen. Bild 3.22 zeigt die während der Brandbeanspruchung gemessene Zugkraft an der Spannankerseite und Bild 3.23 die gemessenen Dehnungen im Abspannelement auf der Festankerseite (FA). Auf die Darstellung

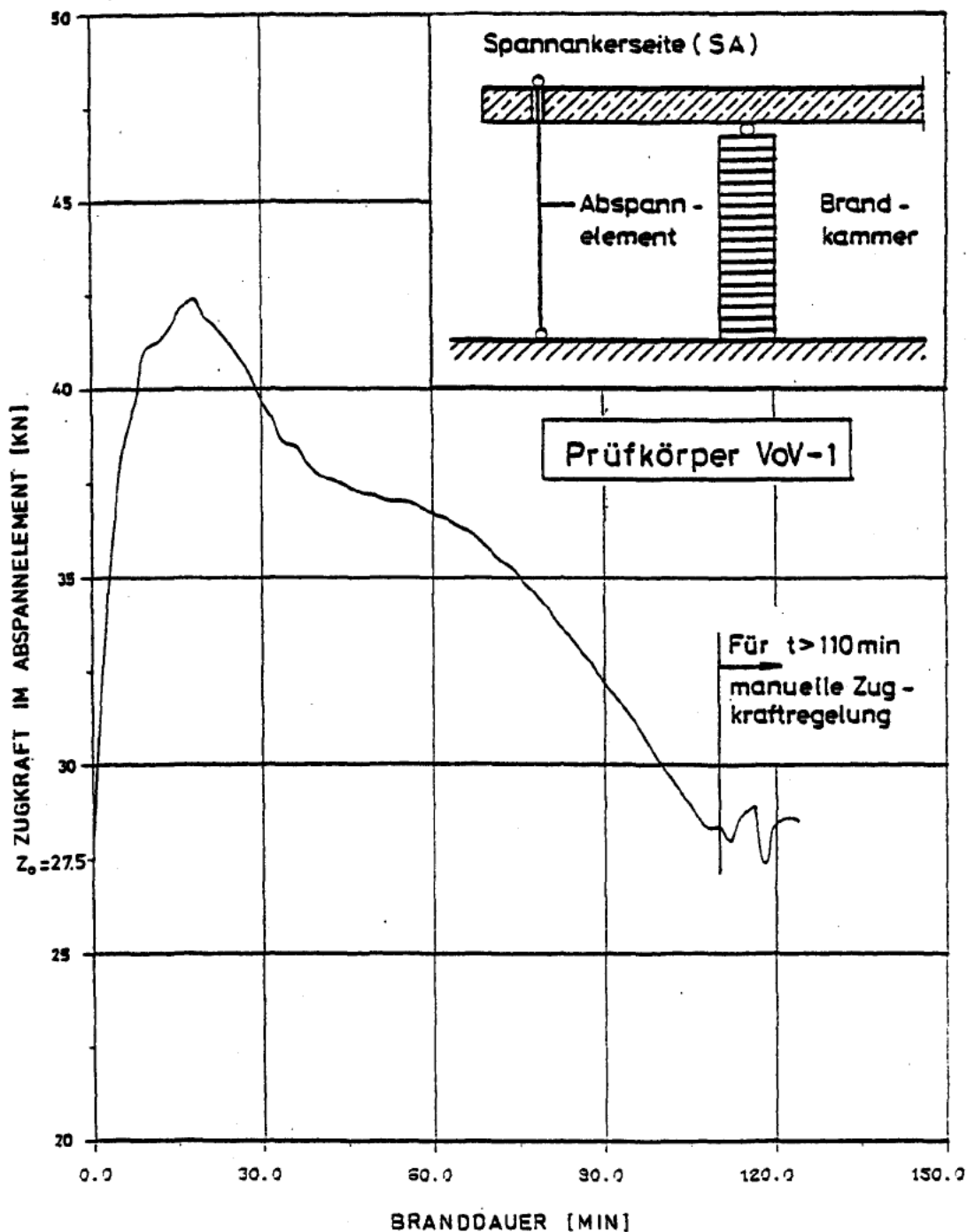


Bild 3.22: Zugkraft im Abspannelement an der Spannankerseite, Prüfkörper VoV-1

der Dehnungsentwicklung im Abspannelement auf der Spannankerseite wird verzichtet, weil ausreichende Übereinstimmung mit der gemessenen Zugkraft (Bild 3.25) besteht.

Ab der 110. Versuchsminute wurde versucht, die Zugkraft durch manuelle Regelung konstant zu halten. Die dafür verwendete Nachstellvorrichtung erwies sich als nicht geeignet (s. Abschnitt 3.3.5.4).

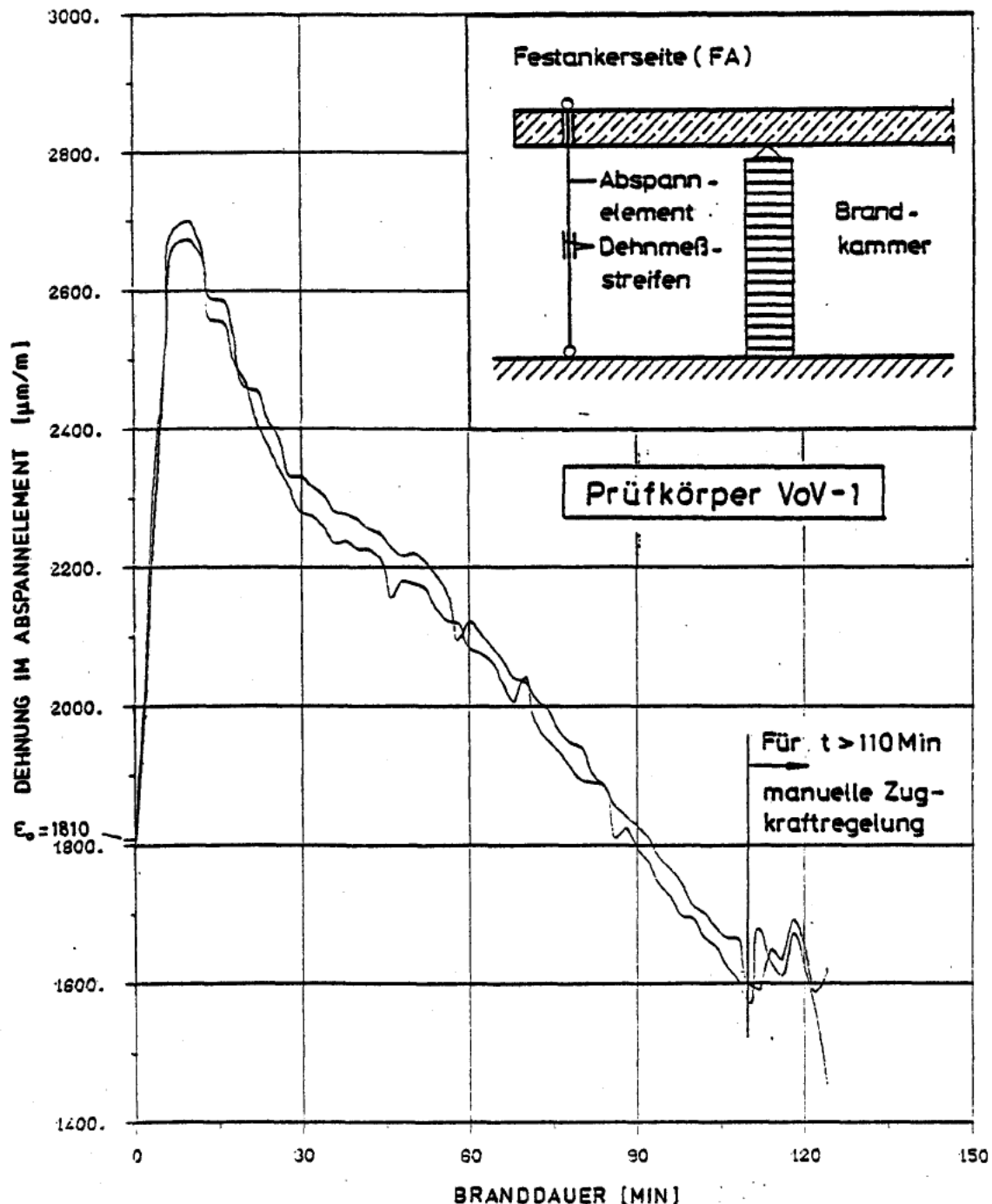


Bild 3.23: Dehnungen im Abspannelement an der Festankerseite, Prüfkörper VoV-1

3.3.5.3 Prüfkörperverformungen

Die vertikalen Verformungen an den fünf Meßstellen im beflamnten Feld sowie an den beiden Meßstellen auf den Kragarmen blieben bis zur 90. Versuchsminute kleiner als ± 2 mm. Gegen Versuchsende zur 125. Minute betrug die maximale vertikale Verformung ungefähr 6 mm, d. h. das Verhältnis Durchbiegung zur Stützweite betrug $f/l \approx 1/1000$. Wegen der geringen Größe der vertikalen Verformungen wird auf eine Darstellung verzichtet.

Die horizontalen Verformungen, gemessen jeweils am Kragarmende an zwei übereinanderliegenden Meßpunkten, sind aus den Anlagen 14 und 15 zu ersehen.

3.3.5.4 Sonstige Beobachtungen

10. Versuchsminute: Querrisse auf der Prüfkörperoberseite in Feldmitte durch Wasseraustritt zu erkennen.

15. Versuchsminute: Bereich mit Querrissen auf der Prüfkörperoberseite (Abstand der Risse ca. 30 cm) reicht bis jeweils 1 m an die Auflagerlinien heran. Wasseraustritt aus den Querrissen: Prüfkörperoberseite ist im Bereich der Querrisse durchgehend feucht.

20. Versuchsminute: Eckabplatzung von 15 mm Breite und 15 mm Höhe an der brandraumseitigen Kante im Bereich 0,5 m bis 1,5 m vom horizontal unverschieblichen Auflager.

25. Versuchsminute: Flammenbildung in Feldmitte auf der brandbeanspruchten Prüfkörperunterseite

85. Versuchsminute: Flammenbildung nicht mehr zu beobachten.

125. Versuchsminute: Versuchsende.

Der Prüfkörper VoV-1 konnte nicht bis zum Bruch geprüft werden, weil die Verankerung eines Abspannelements beim Nachstellen der Zugkraft in der 125. Versuchsminute versagte. Ab der 110. Versuchsminute mußte die Zugkraft in den Abspannelementen manuell nachgeregelt werden, um sie auf den Wert vom Versuchsbeginn zu halten. Damit sollte näherungsweise die konstante Verkehrslast im nicht beflamten Prüfkörperbereich berücksichtigt werden.

Nach Versuchsende waren auf der Prüfkörperoberseite im Verlauf der Spanngliedachsen mehrere dunkelbraune Flecken ($\varnothing \sim 30$ cm) zu erkennen, die durch ausgetriebenes Korrosionsschutzfett entstanden waren (Bild 3.24).

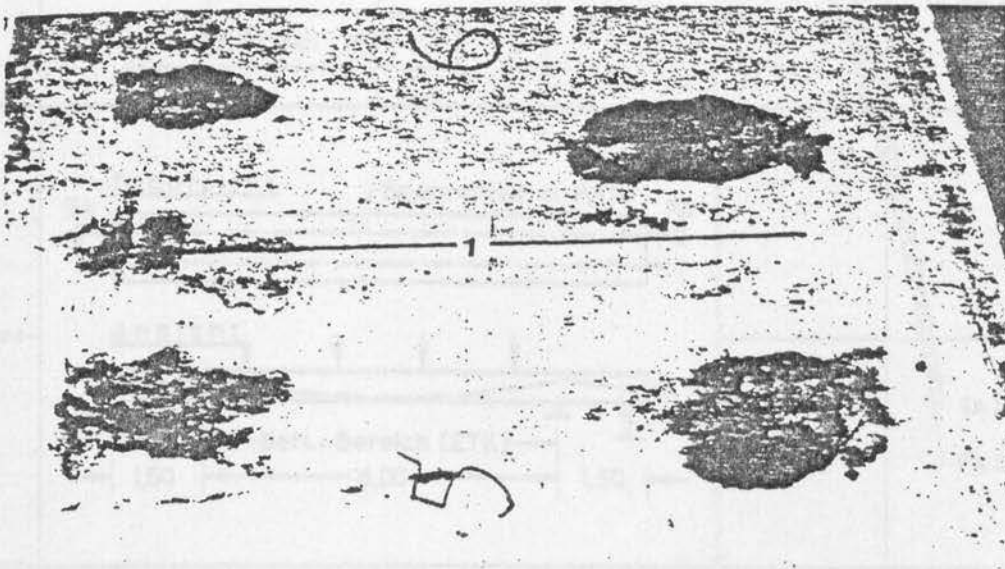


Bild 3.24: Flecken auf der Prüfkörperoberseite nach dem Brandversuch, Prüfkörper VoV-1

3.3.6 Prüfkörper VoV-2

3.3.6.1 Vorspannkräfte

Die Veränderungen der Vorspannkräfte während der Brandbeanspruchung zeigt Bild 3.25; der Verlauf der Meßwerte ist ähnlich wie beim Prüfkörper VoV-1.

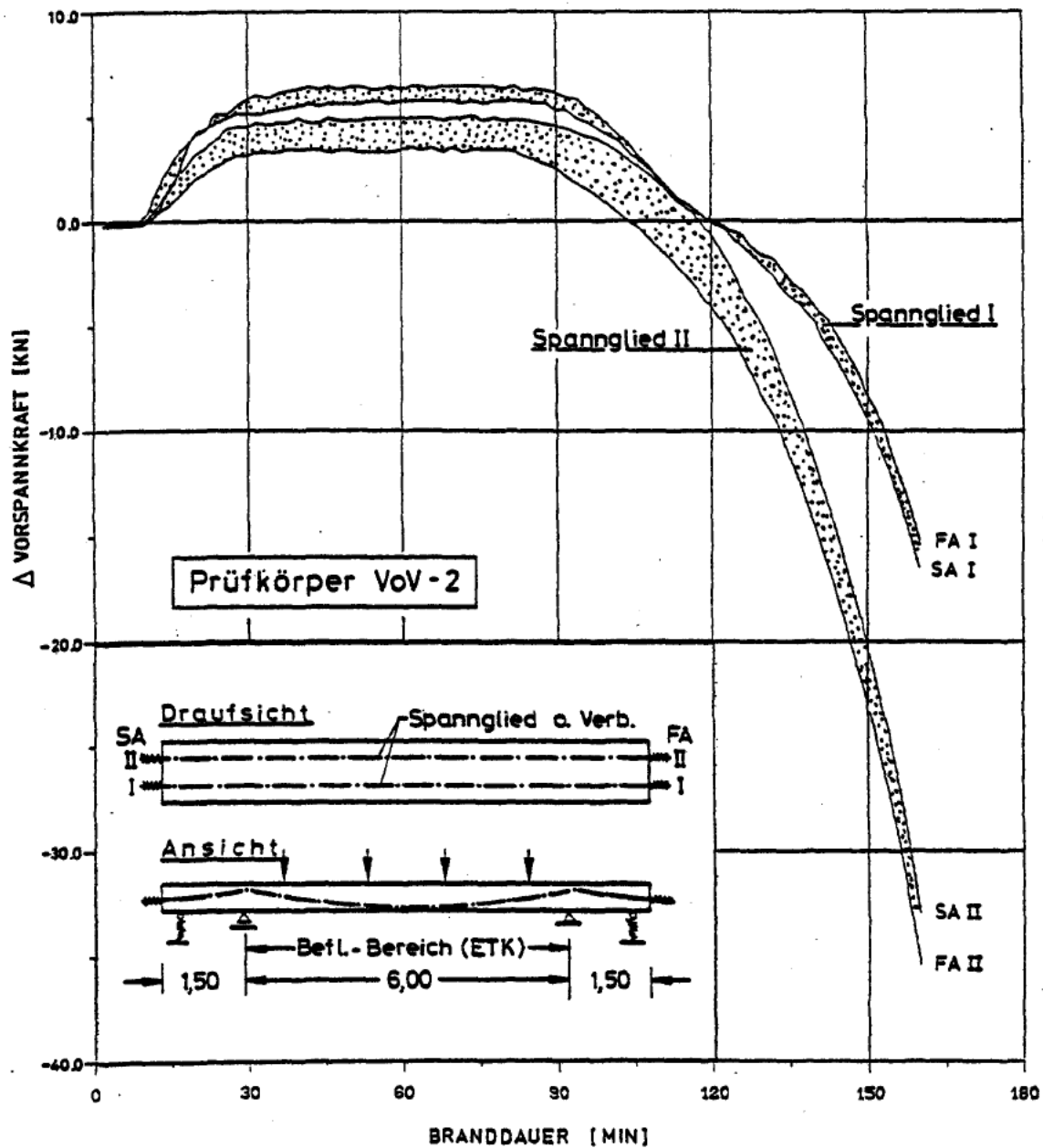


Bild 3.25: Veränderungen der Vorspannkraften im Prüfkörper VoV-2 während der Brandbeanspruchung

Bis zur 10. Versuchsminute veränderten sich die Vorspannkraften nicht. Danach stiegen sie in einem Übergangsbereich bis zur 38. Minute zwischen 3 kN und 6,5 kN an. Diese Spannkraft blieb bis ungefähr zur 85. Minute konstant. Zum Versuchsende in der 161. Minute verringerte sich die Vorspannkraft zwischen 15 kN im Spannglied I und 35 kN im Spannglied II. Der Versuch wurde abgebrochen, nachdem Spannglied II in der 161. Minute schlagartig versagte.

3.3.6.2 Zugkräfte in den Abspannelementen

Die Veränderung der Zugkraft im Abspannelement auf der Spannankerseite während der Brandbeanspruchung ist auf Bild 3.26 zu ersehen. Am Plattenkragarm auf der Festankerseite wurden die Veränderungen im Abspannelement über Dehnmeßstreifen registriert; die Meßwerte sind im Bild 3.27 dargestellt. Das

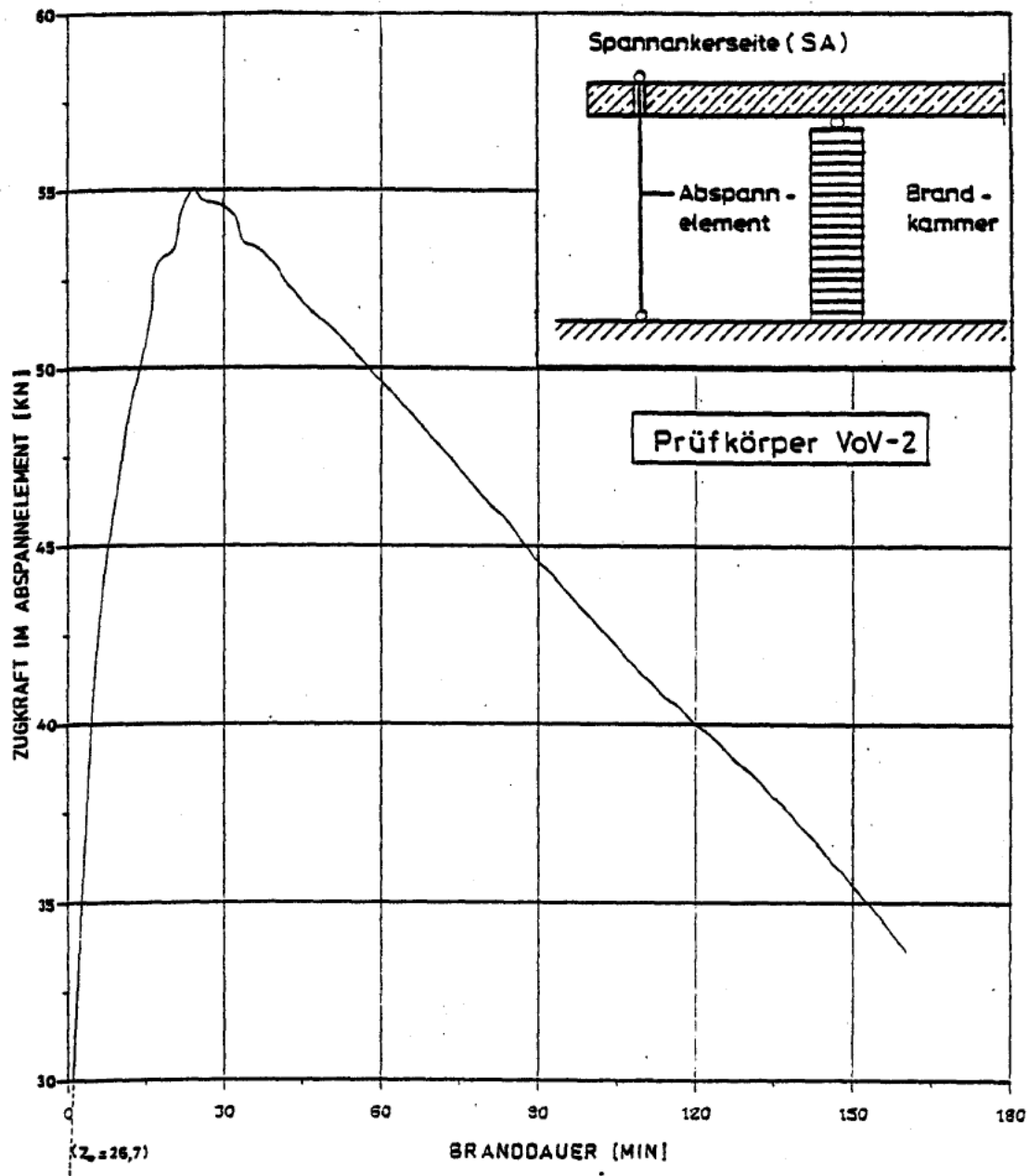


Bild 3.26: Zugkraft im Abspannelement an der Spannankerseite, Prüfkörper VoV-2

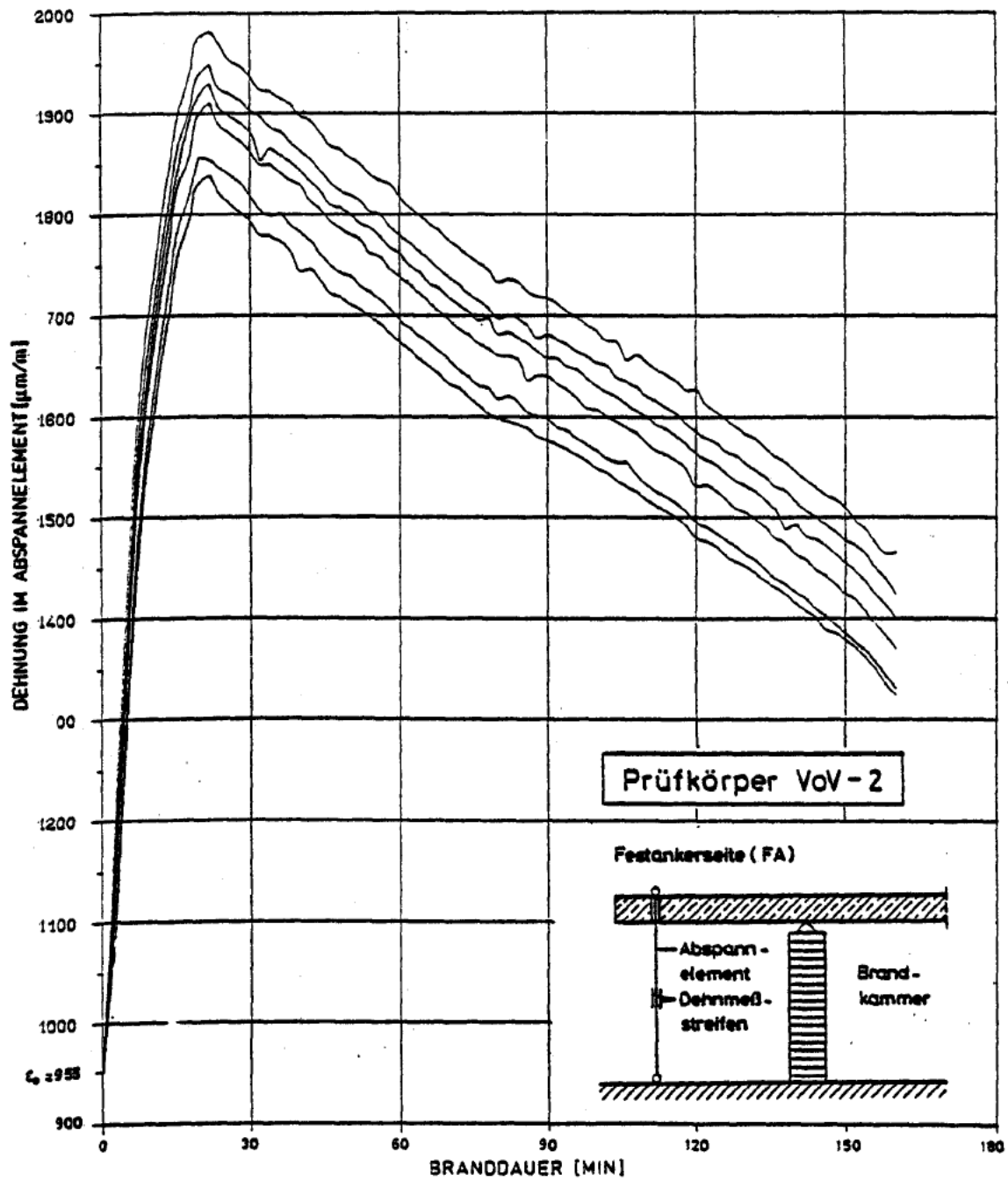


Bild 3.27: Dehnungen im Abspannelement an der Festankerseite, Prüfkörper VoV-2

Streuband der Meßwerte wurde vermutlich durch Biegeeinflüsse im Abspannelement verursacht.

3.3.6.3 Prüfkörperverformungen

Im Bild 3.28 sind die während des Brandversuchs gemessenen vertikalen Verformungen dargestellt. Im brandbeanspruchten Feld wuchsen die Durchbiegungen während der ersten 30 Versuchsminuten fast linear an, blieben dann für ca. 30 Minuten unverändert und gingen bis zum Versuchsende in der 161. Minute zwischen 2 mm und 4 mm zurück. Die vertikalen Verformungen an den Kragarmen wuchsen bis zur 30. Versuchsminute an und blieben dann bis zum Versuchsende annähernd konstant.

Die während des Brandversuchs gemessenen horizontalen Verformungen für den Prüfkörper VoV-2 sind aus den Anlagen 16 und 17 zu ersehen.

3.3.6.4 Sonstige Beobachtungen

- 12. Versuchsminute: Querrisse auf der Prüfkörperunterseite im Bereich 1 m bis 3 m vom horizontal verschieblichen Auflager
Flammenbildung im Rißbereich.
- 17. Versuchsminute: Querrisse auf der Prüfkörperoberseite in Feldmitte durch Wasseraustritt zu erkennen.
- 25. Versuchsminute: Flammenbildung im Rißbereich auf der Prüfkörperunterseite beendet.
- 30. Versuchsminute: Querrisse auf der Prüfkörperoberseite im gesamten beflamnten Bereich.
- 35. Versuchsminute: Gesamte Prüfkörperoberseite mit Wasser bedeckt.
- 47. Versuchsminute: Erneute Flammenbildung in den Querrissen auf der Prüfkörperunterseite, besonders deutlich punktförmige Flammen in der Achse von Spannglied I.

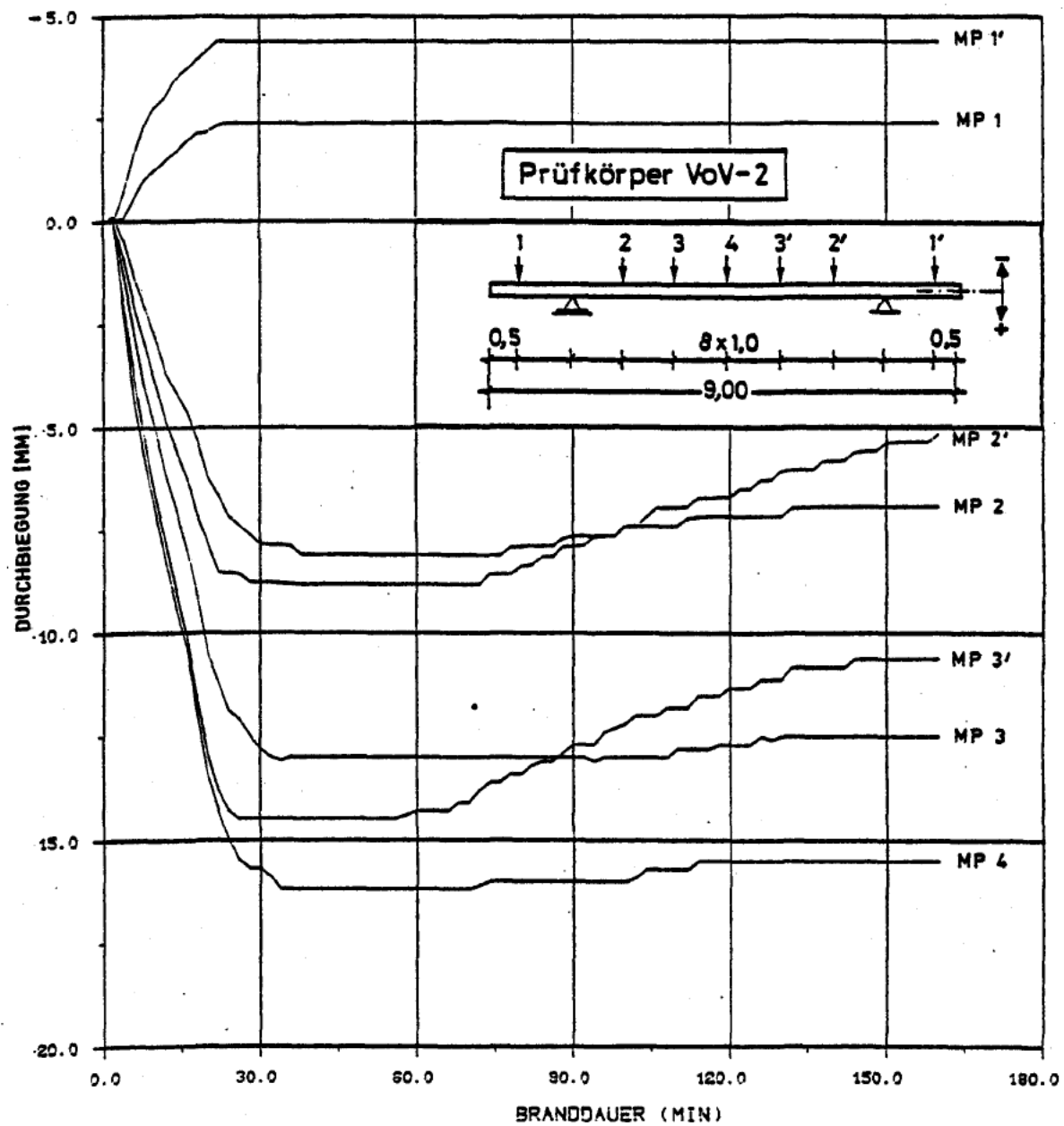


Bild 3.28: Vertikale Verformungen des Prüfkörpers VoV-2

53. } Versuchsmminute: Auf der Prüfkörperunterseite wird an verschiedenen
bis } Stellen Flammenbildung beobachtet, teilweise verlö-
90. } schen die Flammen nach einigen Minuten und erscheinen
nach einiger Zeit wieder. Ab der 90. Versuchsmminute
wird keine Flammenbildung an der Prüfkörperunterseite
beobachtet.
161. Versuchsmminute: Bruch von Spannglied II. Versuchsende durch Entlastung
des beflamnten Feldes und Abschalten der Ölbrenner.
170. Versuchsmminute: Bruch von Spannglied I.

Der Prüfkörper zeigte nach dem Bruch der Spannglieder keine Betonzerstörungen.
An der Oberfläche waren im Verlauf der Spanngliedachsen mehrere dunkelbraune
Flecken ($\varnothing \sim 30$ cm) zu erkennen, die durch ausgetriebenes Korrosionsschutz-
fett entstanden waren (s. Anlage 13).

Die genaue Lokalisierung der Spannstahlbruchquerschnitte im Prüfkörper war
nicht möglich, weil beim Bruch die Spannglieder auf beiden Verankerungssei-
ten aus dem Prüfkörper herauskatapultiert wurden und dabei die Federtöpfe
aus ihren Halterungen rissen (s. Bild 3.29 und 3.30). Dabei lösten sich
die Spanngliedverankerungen. Durch nachträgliches Vermessen der vollstän-
dig ausgebauten Spannstahlritzen wurde festgestellt, daß die Bruchstelle
vom Spannglied II ungefähr 50 cm versetzt von Feldmitte zum unverschiebli-
chen Auflager hin lag, während die Bruchstelle vom Spannglied I annähernd
in Feldmitte lag.

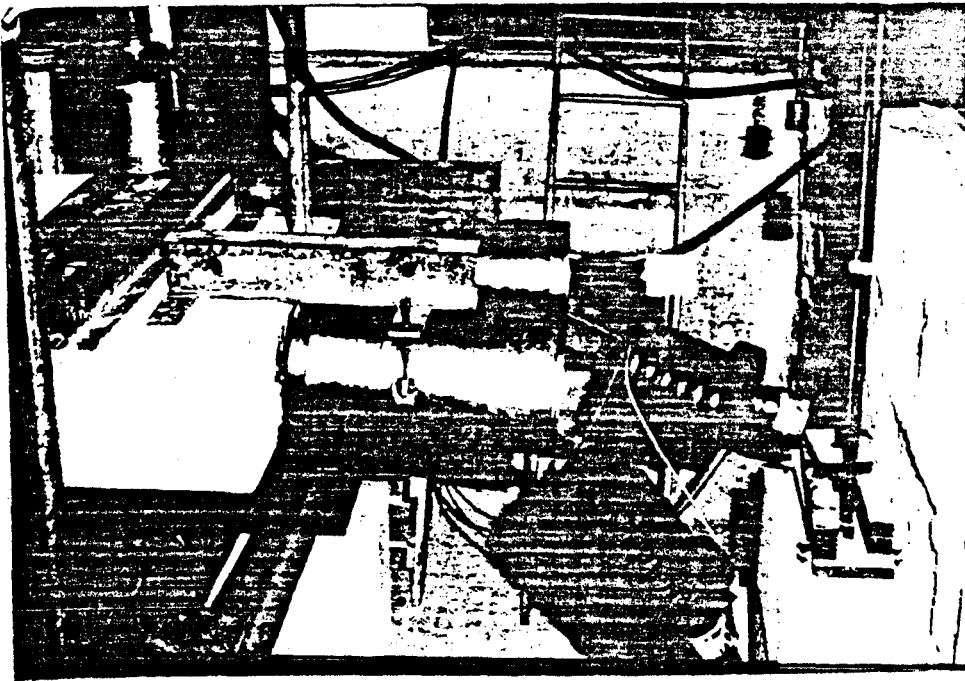


Bild 3.29: Federtöpfe nach Bruch der Spannglieder, Festankerseite, Prüfkörper VoV-2

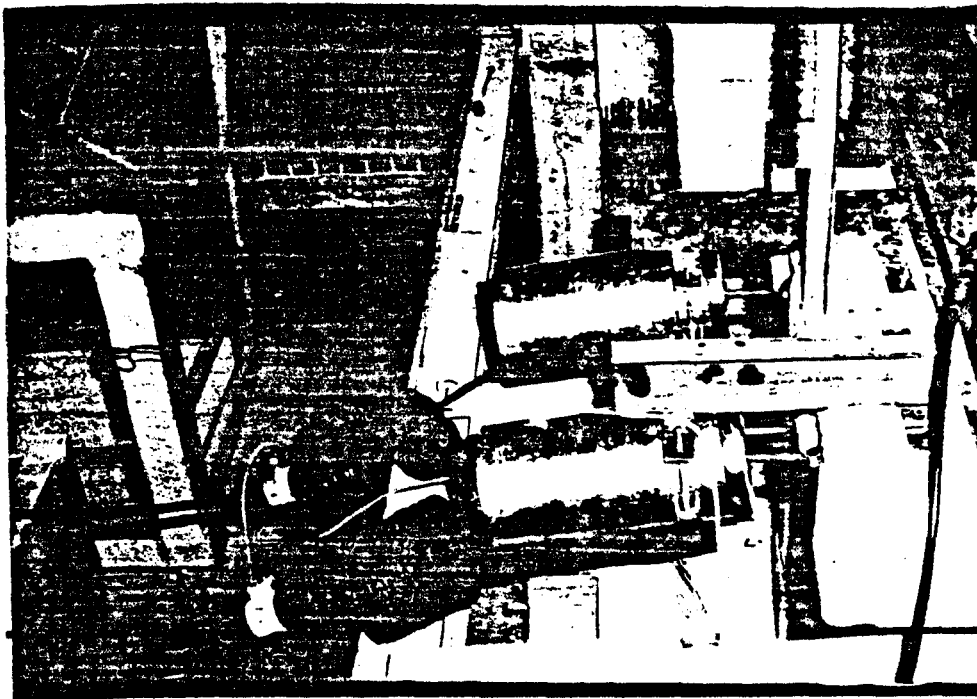


Bild 3.30: Federtöpfe nach Bruch der Spannglieder, Spannankerseite, Prüfkörper VoV-2

3.4 Diskussion der Versuchsergebnisse

Es wurden zwei Prüfkörper mit der Bezeichnung VoV-1 und VoV-2 geprüft. Die Prüfkörper hatten gleiche Abmessungen und Baustoffgüten sowie gleiche Lage der Spannstahl- und Betonstahlbewehrung. Die Spannkraft war in beiden Prüfkörpern nahezu gleich. Die Prüfkörper bestanden aus einem 6 m langen, beflammtten Feld mit beidseitig angrenzenden, 1,5 m langen Kragarmen.

Im ersten Brandversuch (VoV-1) wurde das beflammtte Feld ohne Verkehrslast, im zweiten Brandversuch (VoV-2) mit einer Verkehrslast $p = 10 \text{ kN/m}^2$ geprüft. Für die Beurteilung des Trag- und Verformungsverhaltens der Prüfkörper unter Brandeinwirkung sind die Baustoffkennwerte und Belastungsgrößen zum Zeitpunkt des Brandversuchs maßgebend. Für die folgenden Abschnitte bilden deshalb die Tabellen 3.5 bis 3.8 (Baustoffkennwerte) bzw. die Tabellen 3.9 und 3.10 (Belastung) die Grundlage.

3.4.1 Trag- und Verformungsverhalten während der Brandbeanspruchung

Die an den Kragarmen befestigten, vertikalen Abspannelemente bewirkten eine elastische Rotationsbehinderung im Auflagerbereich und dadurch ein Ansteigen der Stützmomente während der Brandbeanspruchung. In den Bildern 3.31 und 3.32 sind über der Branddauer die aus den Zugkräften in den Abspannelementen berechneten Stützmomente sowie die Momente in Feldmitte aufgetragen. Infolge der unterschiedlich ausgebildeten Auflager (verschieblich, unverschieblich) weichen die Stützmomentenverläufe der beiden Auflager eines Prüfkörpers voneinander ab. In der Tabelle 3.11 sind für den Querschnitt in Feldmitte und über dem Auflager die Gebrauchslastmomente und die nach DIN 4227 Teil 6 [1] berechneten Bruchmomente zusammengestellt.

| Bez. | Feldmitte | | Auflager | |
|-------|-----------|-----------------------|----------|-----------------------|
| | M kNm | M _u kNm | M kNm | M _u kNm |
| VoV-1 | - 14,4 | - 90,2 | - 39,2 | - 98,0 |
| VoV-2 | 36,0 | 67,0 | - 38,2 | - 99,0 |

Tabelle 3.11: Gebrauchslast- und Bruchmomente bei Normaltemperatur

Bei Versuchbeginn waren die Stützmomente der Prüfkörper VoV-1 und VoV-2 annähernd gleich groß. Zwischen der 13. und 22. Minute Branddauer erreichten die Momentenzuwächse ihr Maximum; es betrug beim Prüfkörper VoV-1 ungefähr 48 % und beim Prüfkörper VoV-2 ungefähr 87 % des Stützmomentes von Versuchsbeginn. Durch die beim Prüfkörper VoV-2 vorhandene Verkehrslast im beflam-
 teten Feld wurde der Momentenzuwachs über den Auflagern im Vergleich zu Prüf-
 körper VoV-1 (ohne Verkehrslast) annähernd doppelt so groß.

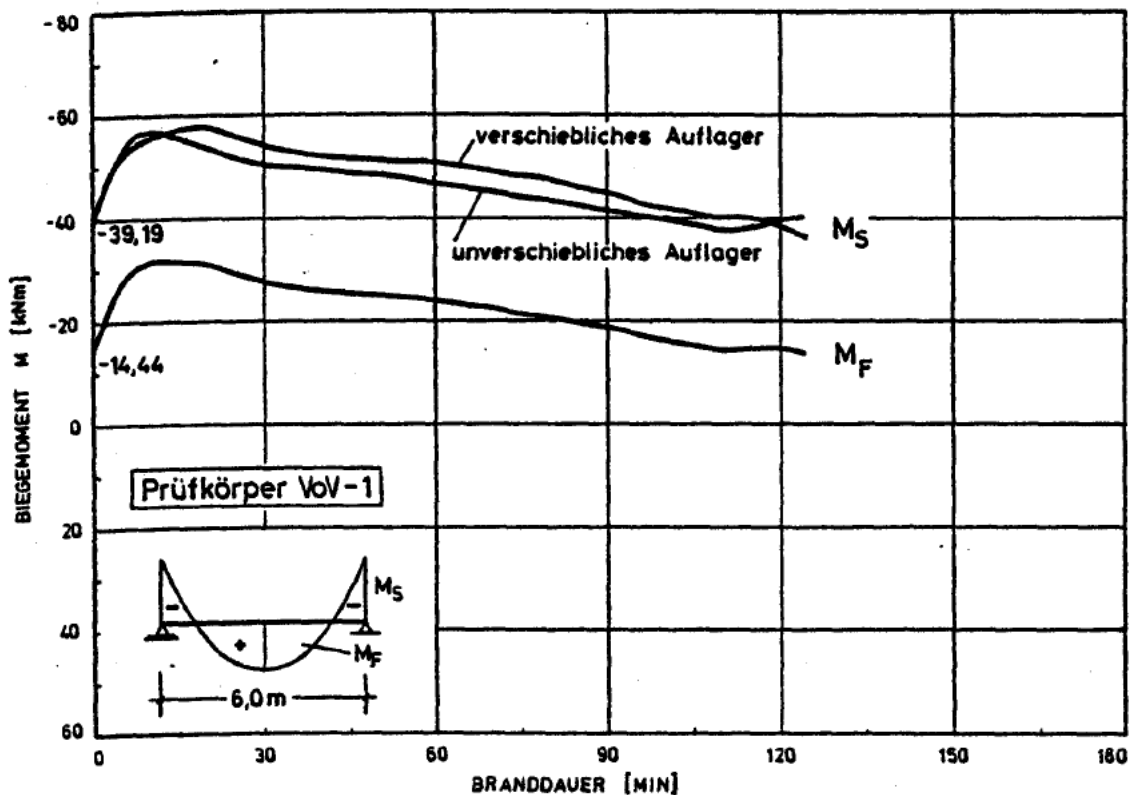


Bild 3.31: Momentenverläufe im Feld und über den Auflagern während der Brandbeanspruchung, Prüfkörper VoV-1

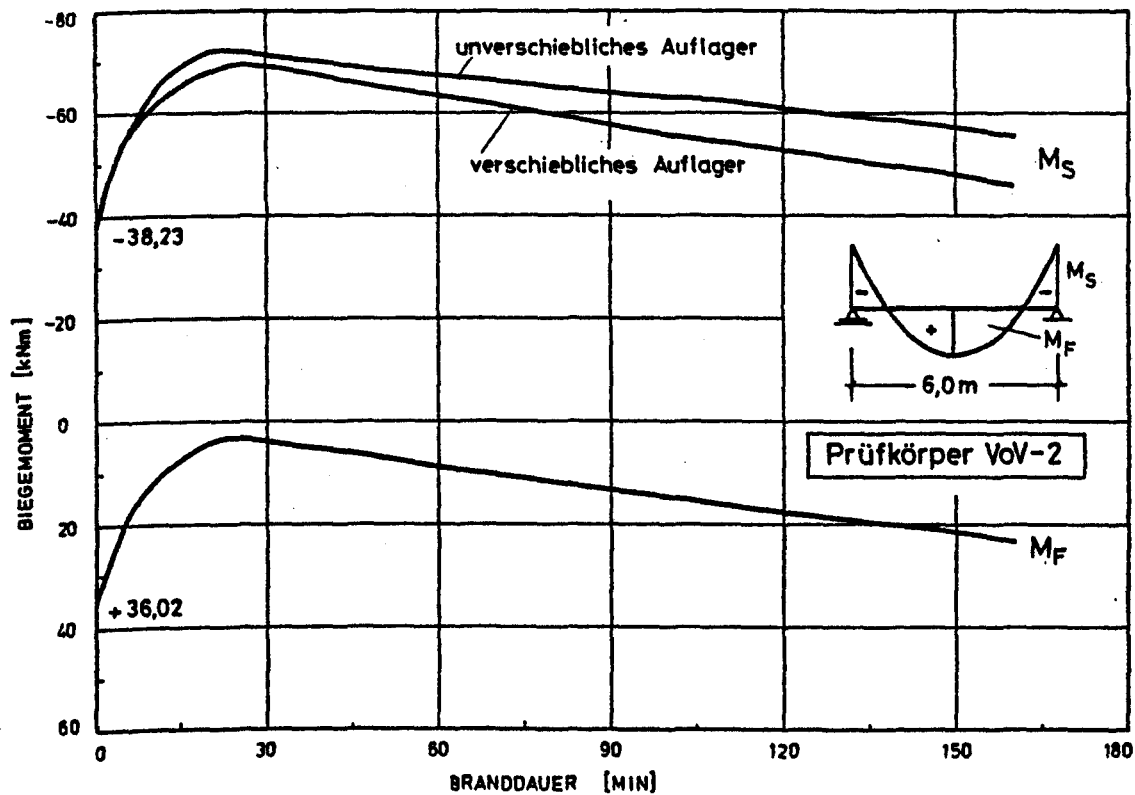


Bild 3.32: Momentenverläufe im Feld und über den Auflagern während der Brandbeanspruchung, Prüfkörper VoV-2

Durch die Vergrößerung der Stützmomente wurden die Feldbereiche entlastet. Im Prüfkörper VoV-1 wuchs das unter Gebrauchslast negative Feldmoment weiter an, im Prüfkörper VoV-2 blieb das maximale Feldmoment während der gesamten Branddauer positiv.

Bild 3.33 zeigt die aus den gemessenen Verformungen am Kragarmende berechneten Endtangentialwinkel der Prüfkörper VoV-1 und VoV-2. Wegen der großen Steifigkeit der Kragarme entsprechen diese Winkel näherungsweise den Verdrehungswinkeln über den Auflagern.

Die Veränderung der Stützmomente wurde durch die teilweise behinderte thermische Verformung sowie durch die Veränderung der Spannkkräfte verursacht, wobei der Anteil aus behinderter thermischer Verformung den Charakter einer Zwangsschnittgröße aufweist, d. h. er verändert sich proportional mit der Steifigkeit des Tragwerks, während der durch die Veränderung der Spannkraft

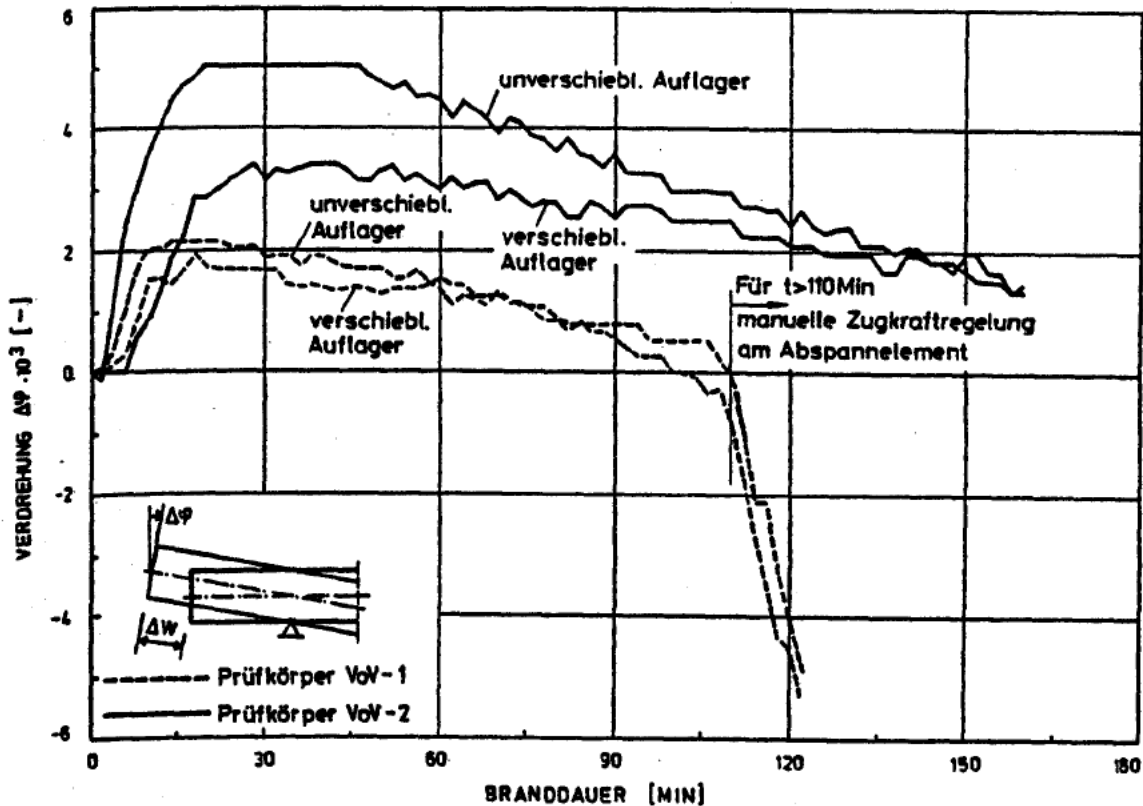


Bild 3.33: Tangentenwinkel am Kragarmende

hervorgerufene Momentenanteil wenig von der Steifigkeitsänderung des Tragwerks beeinflusst wird, sondern hauptsächlich von der Längenänderung des Tragwerks bestimmt wird. In [21] wird deshalb empfohlen, die statisch unbestimmte Wirkung der Vorspannung nicht als Zwangsschnittkraft, sondern als "Umlagerungsschnittkraft aus Vorspannung" zu bezeichnen.

In den ersten Minuten des Brandversuchs stiegen die Brandraumtemperaturen entsprechend der ETK rasch an und erreichten nach 10 Minuten Werte von deutlich über 600 °C (s. Anlage 6 und 7). Die Erwärmung des Betonquerschnitts beschränkte sich bis zu diesem Zeitpunkt im wesentlichen auf die unteren, dem Feuer zugekehrten Betonbereiche, so daß die Ausbildung der freien thermischen Verformung durch Bauteilquerschnitte behindert wurde, die annähernd die ursprüngliche Steifigkeit besaßen; entsprechend stark stiegen die Stützmomente in dieser Phase des Brandgeschehens an.

Mit fortschreitender Branddauer wurden auch die weiter innenliegenden Querschnittsbereiche erwärmt, wobei gleichzeitig die temperaturbedingte Festigkeitsabnahme zu einem Abbau der Tragwerkssteifigkeit führte, so daß die steifigkeitsabhängige Schnittgrößenzunahme über den Auflagern zurückging.

Die Veränderung der Steifigkeit des Tragwerks hängt im allgemeinen auch von der Größe und der Lage der schlaffen Bewehrung ab. Sie beeinflusst die Rißbildung und Rißverteilung und übt damit einen wesentlichen Einfluß auf die Stützmomentenveränderung während der Brandeinwirkung aus. Die in den Prüfkörpern VoV-1 und VoV-2 vorhandene schlaffe Längsbewehrung (s. Tabelle 3.3) verhinderte während der gesamten Branddauer, daß es in den Plattenbereichen unter maximaler Biegebeanspruchung zu einzelnen klaffenden Rissen kam. Über die Rißbreiten von den in den Abschnitten 3.3.5.4 und 3.3.6.4 protokollierten Rissen konnten keine genauen Angaben gemacht werden, weil während der Brandversuche die Rißbildung nur augenscheinlich aus mehreren Metern Entfernung beobachtet werden konnte. Hinweise auf die Lage eines vorhandenen Risses wurden aus der Feuchtigkeitsentwicklung (Wasseraustritt) auf der Plattenoberfläche gezogen (s. Abschnitte 3.3.5.4 und 3.3.6.4).

Damit war aber keine Aussage über den genauen Zeitpunkt der Erstrißbildung sowie über das vollständige Rißbild möglich. Außerdem war bei der Rißverfolgung zu beachten, daß die auf der beflamnten Bauteilfläche entstandenen Risse während des weiteren Brandablaufs infolge der anwachsenden thermischen Dehnungen wieder kleiner werden können, teilweise sich sogar vollkommen schließen.

Neben der schlaffen Längsbewehrung war in den Prüfkörpern eine schlaffe Querbewehrung angeordnet (s. Bild 3.4). Nach [26] wird bei Brandeinwirkung durch die Querbewehrung die Ausbildung von Längsrissen parallel zur Spanngliedachse verhindert. Es fehlen bisher ausreichende Versuchsergebnisse, um die erforderliche Menge von schlaffer Querbewehrung festzulegen, die das Entstehen von tragfähigkeitsmindernden Längsrissen verhindert. Ebenso liegen bisher zu wenig experimentelle Ergebnisse vor, um den Einfluß bestimmen zu können, den Spannglieder in der zweiten Richtung (Querrichtung) auf das Tragverhalten brandbeanspruchter Bauteile ausüben.

Trotz der umfangreichen Einschränkungen hinsichtlich Genauigkeit und Aussagefähigkeit von Rißbeobachtungen während der Brandeinwirkung stimmen die Zeitpunkte, zu denen die ersten Querrisse auf der Plattenoberfläche beobachtet wurden, annähernd mit den Zeitpunkten überein, zu denen die Stützmomente nach Erreichen ihres Maximums wieder kleiner wurden (s. Tabelle 3.12).

| Bez. | Branddauer in Minuten | |
|-------|-----------------------|-----------------------|
| | max M_S erreicht | 1. Querriß beobachtet |
| VoV-1 | 13 | 10 |
| VoV-2 | 22 | 12 |

Tabelle 3.12: Vergleich der Branddauern bis zum Erreichen des max. Stützmoments bzw. bis zum Auftreten des ersten beobachteten Querrisses

Ein Vergleich zwischen der zeitabhängigen Momentenveränderung über den Auflager und der zeitabhängigen Spannkraftentwicklung zeigt eine deutlich unterschiedliche zeitbezogene Charakteristik: die Spannkraftentwicklung - im Bild 3.34 als Veränderung der Spannstahlspannung dargestellt - weist in beiden Versuchen zwischen der 35. und 80. Minute der Branddauer ein zeitlich ausgeprägtes Maximum auf, während das Moment über dem Auflager jeweils sofort nach Erreichen des Größtwertes wieder abfällt.

In der Tabelle 3.13 sind die maximalen Werte für das Stützmoment und für die Spannkraft sowie die Branddauer, nach der die Werte gemessen wurden, zusammengestellt. In beiden Versuchen wurde das maximale Stützmoment deutlich früher erreicht als die maximale Spannkraft.

| Bez. | Stützmoment | | | Spannkraft | | |
|-------|-------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| | $M_S(t_0)$ kNm | max $M_S(t)$ kNm | t [min] für max M_S | V (t_0) kN | max V(t) kN | t [min] für max V |
| VoV-1 | - 39,2 | - 57,8 ¹⁾ | 13 | 159,2 ²⁾ | 166,9 ³⁾ | 37 - 80 |
| VoV-2 | - 38,2 | - 71,5 ¹⁾ | 22 | 162,2 ²⁾ | 167,1 ³⁾ | 38 - 85 |

1) Mittelwert vom verschieblichen und unverschieblichen Auflager

2) Mittelwert von Spannglied I und II, s. Tabelle 3.9

3) Mittelwert zwischen Fest- und Spannankerseite

Tabelle 3.13: Maximale Stützmomente und maximale Spannkraft

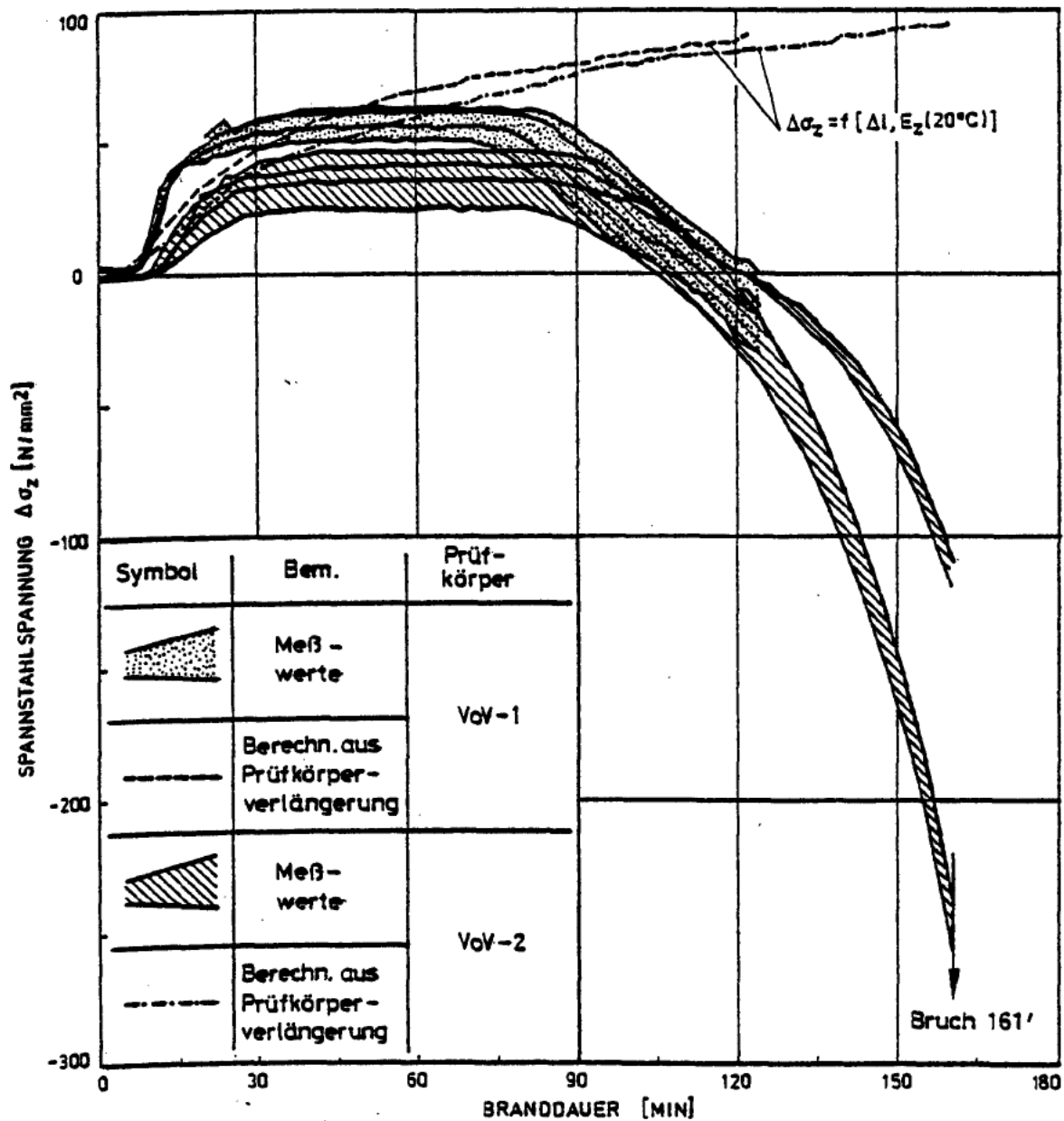


Bild 3.34: Spannungsänderung im Spannstahl während der Brandbeanspruchung

Aus Bild 3.34 erkennt man, daß die Veränderungen der Spannstahl-Spannungen während der Brandbeanspruchung bei den Prüfkörpern VoV-1 und VoV-2 nahezu gleich waren; die maximale Zunahme gegenüber den Spannungen bei Versuchsbeginn betrug beim Prüfkörper VoV-1 ungefähr 5 % und beim Prüfkörper VoV-2 ungefähr 3 %; d. h. die Veränderungen der Spannstahlspannungen während des Brandversuchs wurden bei den geprüften Durchlaufsystemen nur geringfügig von der Größe der Belastung im brandbeanspruchten Feld beeinflusst.

Der Anstieg der Spannstahlspannungen in der ersten halben Stunde der Brandversuche wurde im starken Maß von der Verlängerung der Prüfkörper infolge thermischer Ausdehnung bestimmt. Das unbelastete Feld beim Prüfkörper VoV-1 führte zu größeren horizontalen Ausdehnungen der Platte und damit zu größeren Spannungsanstiegen als beim Prüfkörper VoV-2.

Im Bild 3.35 sind die aus den gemessenen Kragarmverformungen berechneten Verlängerungen in der Plattenmittelfläche dargestellt.

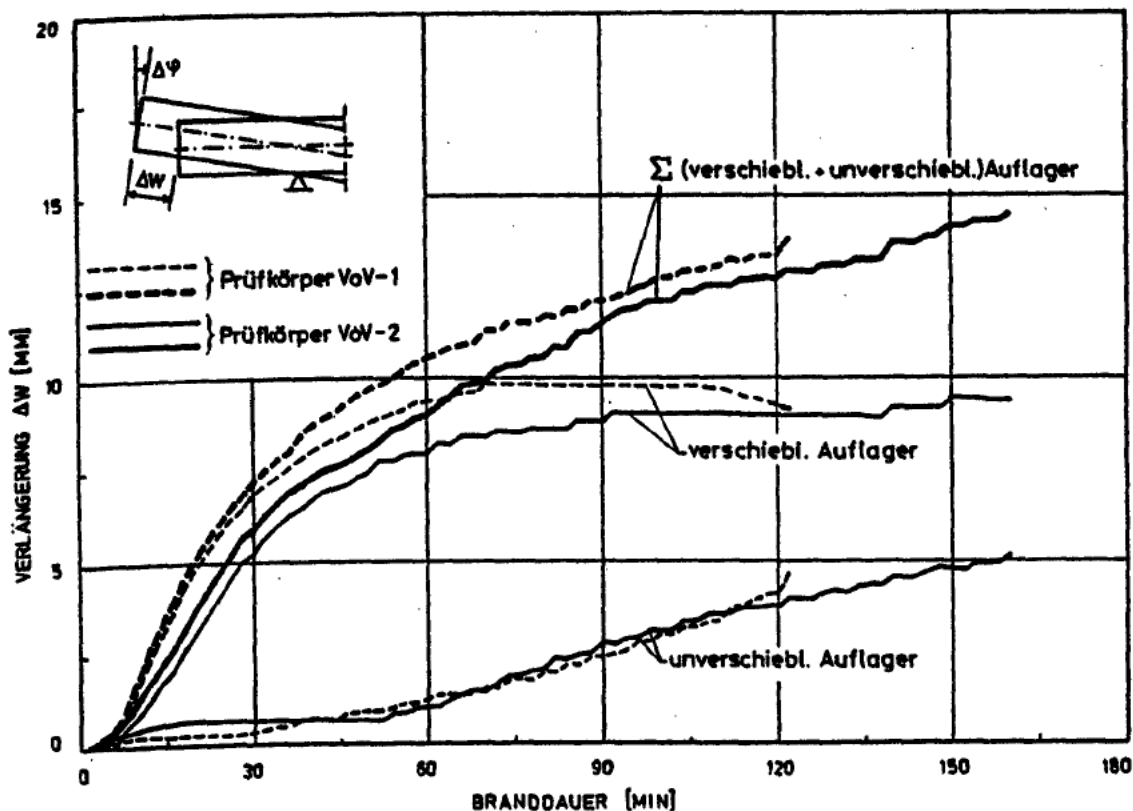


Bild 3.35: Verlängerungen am Kragarmende in Höhe der Plattenmittelfläche

Bei Annahme eines temperaturunabhängigen Elastizitätsmoduls für den Spannstahl, was bis zur 40. Minute Branddauer bei einer maximalen Spannstahltemperatur von kleiner als 125 °C (s. Bild 3.20) eine Überschätzung des E-Moduls im Bereich der maximalen Temperatur von rd. 5 % bedeutet, errechnen sich aus den Verlängerungen am Kragarmende die im Bild 3.34 als gestrichelte (Prüfkörper VoV-1) bzw. als strichpunktierte Kurve (Prüfkörper VoV-2) aufgetragene Veränderungen der Spannstahlspannungen. Der Vergleich mit den gemessenen Spannungsänderungen zeigt die Abhängigkeit der Spannungsänderungen von den Prüfkörperverlängerungen.

Für die Branddauer von über 40 Minuten war der Einfluß aus weiter ansteigender Prüfkörperverlängerung und temperaturbedingter Elastizitätsabnahme nahezu gleich groß, so daß bis zur 85. Minute Branddauer die Veränderungen der Spannstahlspannungen konstant blieben. Mit fortschreitender Branddauer überwog dann die temperaturabhängige Elastizitätsabnahme des Spannstahls sowie die bei höheren Temperaturen größer werdenden Einflüsse aus plastischen Dehnungen und aus Hochtemperatur-Kriechdehnungen, so daß trotz Anwachsens der Prüfkörperverlängerung die Spannstahlspannungen kleiner wurden.

Der beschriebene Verlauf der Spannstahlspannungen während der Brandeinwirkung gilt für einen horizontal nicht dehnbehinderten Prüfkörper. In welchem Umfang der Verlauf der Spannstahl-Spannungen verändert wird, wenn die horizontale Ausdehnung des brandbeanspruchten Deckenfeldes durch angrenzende, kaltbleibende Deckenfelder behindert wird, ist bisher nicht untersucht worden.

Die Anlagen 8 bis 11 zeigen, daß die Spannstahl-Temperatur in Feldmitte nach 90 Minuten Branddauer zwischen $T = 238\text{ °C}$ und $T = 253\text{ °C}$ lagen, d. h. die in der brandschutztechnischen Bemessung für diesen Zeitpunkt vorgegebene Temperatur $T = 300\text{ °C}$ wurde um rd. 50 °C unterschritten. Diese Temperaturdifferenz ist vermutlich auf den relativ hohen Kalksteinanteil in den Zuschlägen zurückzuführen (s. Abschnitt 3.1.2), wodurch der Beton langsamer erwärmte als DIN 4102 Teil 4 für Normalbeton mit überwiegend quarzhaltigen Zuschlägen voraussetzt [27].

Für die Berechnung der Spannungsveränderung im verbundlos geführten Spannglied während der Brandbeanspruchung ist es notwendig, neben dem Formänderungsverhalten des Gesamttragwerks das unterschiedliche temperaturabhängige Festigkeits- und Verformungsverhalten von Spannstahl und Beton zu berücksichtigen; d. h. in die bei Normaltemperatur zur Berechnung der Spannstahlspannungen geltende Gleichung (3.1)

$$\epsilon_z = \epsilon_{z,o} + \frac{1}{l} \int_0^l \epsilon_{b,z} dx \quad (3.1)$$

müssen die lastabhängigen Dehnungen ϵ_z und $\epsilon_{b,z}$ temperaturabhängig eingeführt werden, und außerdem muß das unterschiedliche thermische Ausdehnungsverhalten von Beton und Spannstahl durch die lastunabhängigen Dehnungen $\epsilon_{b,th}$

und $\epsilon_{z,th}$ in der Verträglichkeitsbedingung berücksichtigt werden [20]:

$$\int_0^l (\epsilon_z - \epsilon_{z,o} + \epsilon_{z,th}) dx = \int_0^l (\epsilon_{b,z} + \epsilon_{b,th}) dx \quad (3.2)$$

ϵ_z : Zwangdehnung des Spannstahls

$\epsilon_{z,o}$: Spannbettdehnung

$\epsilon_{z,th}$: Thermische Dehnung des Spannstahls

$\epsilon_{b,z}$: Zwangdehnung des Betons in Höhe der Spanngliedachse

$\epsilon_{b,th}$: Thermische Dehnung des Betons

Wegen der im Feldbereich im allgemeinen parabelförmig verlegten Spannglieder und des dadurch vorhandenen Temperaturprofils entlang der Stabachse (s. Bild 3.20) werden veränderliche Spannstahldehnungen $\epsilon_z = \epsilon_z(T,x)$ in Bauteillängsrichtung zur Aufnahme der konstanten Vorspannkraft aktiviert.

Die Verträglichkeitsbedingung entsprechend Gleichung (3.2) muß im Brandfall iterativ gelöst werden, d. h. die Berechnung ist zweckmäßigerweise rechnergestützt durchzuführen.

3.4.2 Versagen

Bei Normaltemperatur bleibt der Spannstahl-Spannungszuwachs vom sog. Spannbettzustand bis zum Biegebruch bei Vorspannung ohne Verbund kleiner als bei einem mit Verbund gespannten Bauteil mit gleich großen Biegeverformungen [22]. In Belastungsversuchen an Bauteilen mit verbundlos geführten Spanngliedern wurde im Versagenszustand nach relativ großen Verformungen in der Regel ein Ausbrechen der Betondruckzone beim Erreichen der Grenzstauchung beobachtet, d. h. der Versagensvorgang entsprach dem sonst üblichen Bruch mit Vorankündigung [23]. Die Spannstahl-Spannung erreichte bei diesen Versuchen an Einfeldträgern mit verteilter Belastung und fülliger Momentenlinie bei Annäherung an den Versagenszustand teilweise die Streck- bzw. $\beta_{0,2}$ -Grenze [23, 24].

Sicherlich wird sich bei mehreren Feldern - beispielsweise bei vorgespannten Flachdecken - ein geringerer Spannungszuwachs einstellen, denn

infolge des Gleitens des Spannstahls auf der ganzen Länge gleicht sich die gesamte Längenänderung bei größerer Krümmung unter Überlast in einem Feld über die zunächst geringere Dehnungszunahme in den anderen Feldern aus [23].

Im Brandfall bleibt die Belastung während der Brandbeanspruchung unverändert; das Versagen wird bei überwiegend auf Biegung beanspruchten Bauteilen im allgemeinen durch Verringerung der Werkstofffestigkeiten verursacht. Voraussetzung dafür ist, daß keine zerstörenden Betonabplatzungen auftreten und daß bei statisch unbestimmt gelagerten Bauteilen die thermisch bedingten Zwang- und Umlagerungsschnittkräfte aufgenommen werden können.

Statisch bestimmt gelagerte, schwach bewehrte Bauteile mit Vorspannung mit Verbund, die mit ihrer rechnerisch zulässigen Gebrauchslast beansprucht werden, versagen, wenn die Spannstahl-Spannung und die temperaturabhängige Festigkeit die Größe nach Gleichung (3.3) erreichen.

$$\sigma_{zu}(T) = \frac{1}{\gamma} \beta_{0,2} \cdot \frac{z_u}{z_u(T)} + \frac{N}{A_z} \quad (3.3)$$

Dieser Zusammenhang wird in DIN 4102 Teil 4 zur Definition der sog. kritischen Temperatur benutzt: sie wird in den für die brandschutztechnische Bemessung bereitgestellten Tabellen und Schaubildern in Anlehnung an die Ergebnisse von Warmkriechversuchen als die Temperatur festgesetzt, bei der der Spannstahl unter einer bestimmten Belastung annähernd die Dehngeschwindigkeit von $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ erreicht [14]. Die Anwendung der kritischen Temperatur als Entwurfparameter setzt voraus, daß die Spannstahlspannung im Bruchzustand unter Brandeinwirkung bekannt ist.

In den Bildern 3.36 und 3.37 sind die während der Brandversuche gemessenen Spannstahl-Spannungen, bezogen auf die Zugfestigkeit bei Raumtemperatur, über der Temperatur im Spannstahl dargestellt. Zusätzlich ist in die Bilder der Verlauf der Grenzwerte des bezogenen Spannstahl-Spannungsabfalls eingezeichnet, die nach DIN 4102 Teil 4 zur kritischen Temperatur führen.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde nur im zweiten Brandversuch (Prüfkörper VoV-2) der Bruch der Spannglieder erreicht. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich deshalb auf den zweiten Brandversuch. Der Bruchquerschnitt vom Spannglied II, das zuerst versagte, lag annähernd in Feldmitte, im Bereich der maximalen Spannstahltemperaturen, zum Versagenszeitpunkt wurden am Spannstahl $T = 383 \text{ °C}$ gemessen.

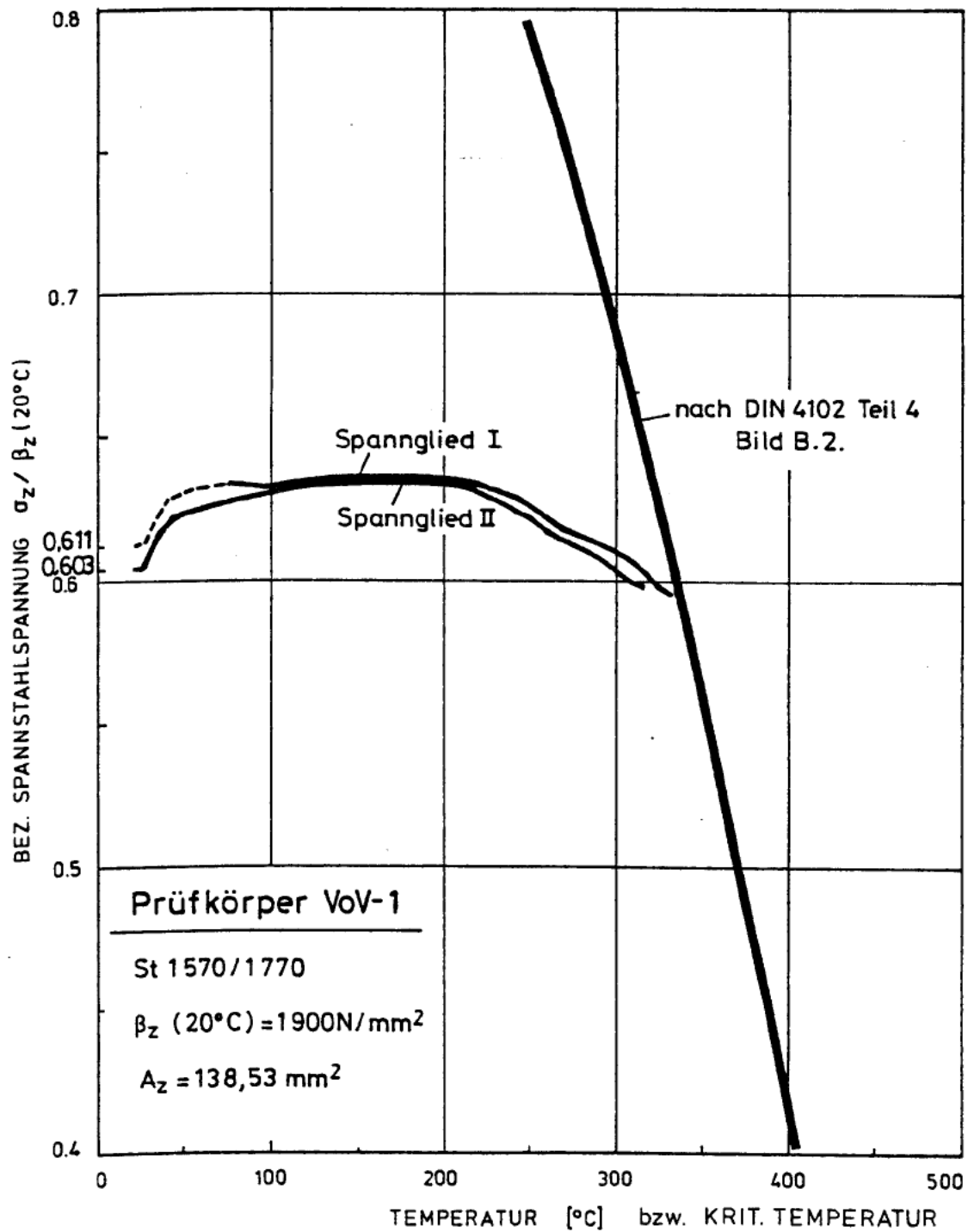


Bild 3.36: Bezogene Spannstahl-Spannung vorh $\sigma_z / \beta_z (20^\circ\text{C})$ im Brandversuch VoV-1 und nach DIN 4102 Teil 4 (crit T). Spannstahl-Temperaturen in Feldmitte

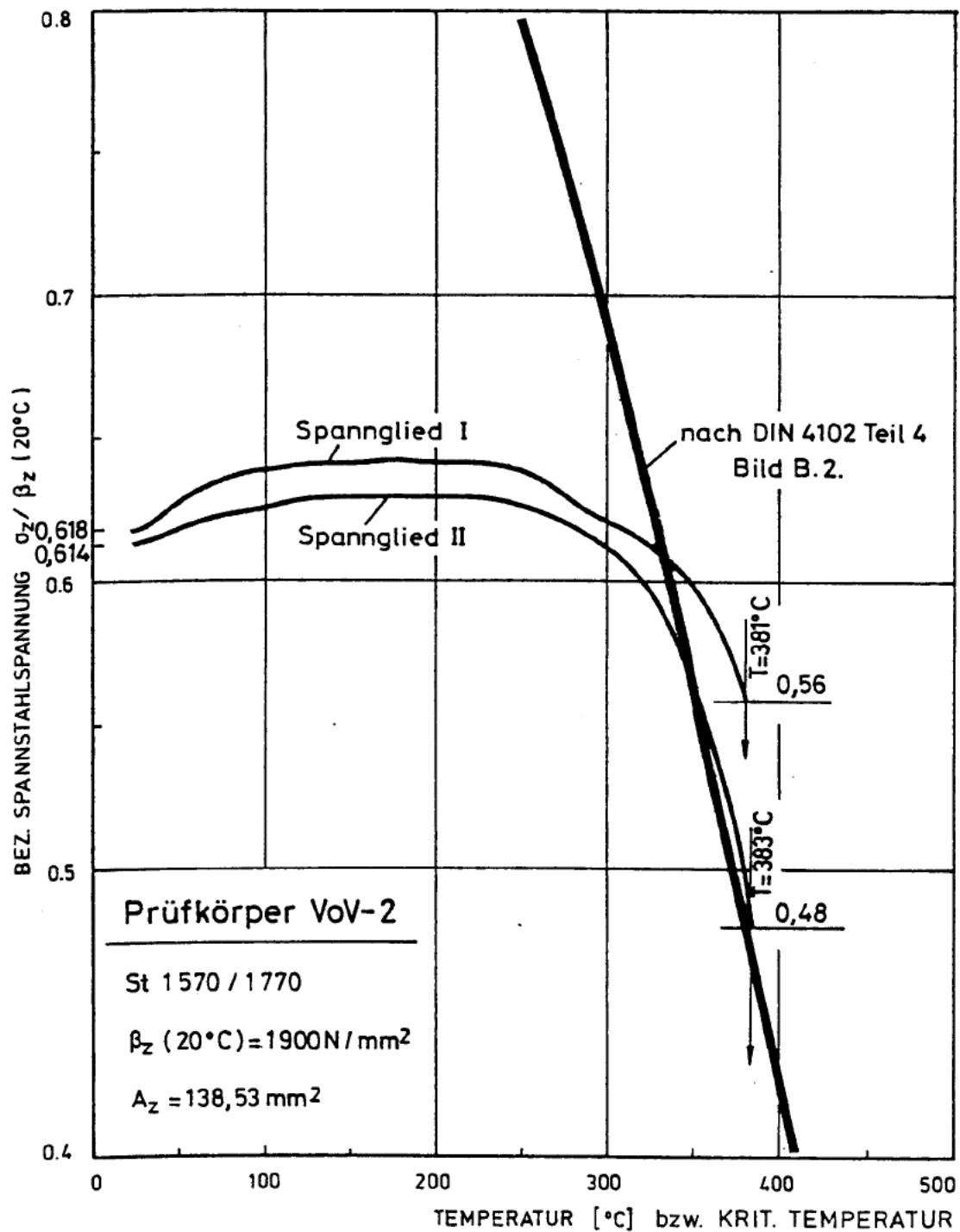


Bild 3.37: Bezogene Spannstahl-Spannung vorh $\sigma_z / \beta_z (20^\circ\text{C})$ im Brandversuch VoV-2 und nach DIN 4102 Teil 4 (crit t).
Spannstahl-Temperaturen in Feldmitte

Wie im Abschnitt 3.4.1 beschrieben, stiegen die Spannstahl-Spannungen während des Brandversuchs nur geringfügig an. Gegen Versuchsende, bei Temperaturen am Spannstahl in Feldmitte von $T > 300\text{ °C}$ fielen die Spannstahl-Spannungen unter den Ausgangswert von $0,61 \cdot \beta_z$. Im Spannglied II betrug die Spannung kurz vor dem Versagen $\sigma_z = 0,48 \cdot \beta_z$ und im Spannglied I $\sigma_z = 0,56 \cdot \beta_z$. Diese Spannungsunterschiede - bei annähernd der gleichen Temperatur - sind vermutlich auf Streuungen in den Materialeigenschaften sowie auf unterschiedlich stark ausgeprägte Reibungseinflüsse im Bereich des zerstörten Korrosionsschutzes zurückzuführen (s. Bild 3.38).



Bild 3.38: Zerstörter Korrosionsschutz in Feldmitte nach 161 Minuten Branddauer (Prüfkörper VoV-2)

Aus den im Bild 3.20 aufgetragenen Temperaturverläufen in der Spannstachse erkennt man, daß nur der unmittelbare Bereich in Feldmitte mit der maximalen Temperatur beansprucht wurde, zu den Auflagern fielen die Temperaturen stark ab. Durch diesen eng begrenzten Bereich mit der höchsten Temperaturbeanspruchung blieb der Einfluß der dort aktivierten Hochtemperatur-Verformungen auf die Gesamtverformung des Spannstahls gering. Ähnlich wie bei Normaltemperatur in einem über mehrere Felder durchlaufenden Spannglied die Krümmungszunahme unter Überlast in einem Feld nur einen geringen Spannungszuwachs im Spannstahl bewirkt, so verursachen die unter Brandeinwirkung örtlich auftretenden Hochtemperaturverformungen eine nur geringe Spannungsabnahme. Das

Spannglied II brach schlagartig, ohne daß durch Anwachsen der Durchbiegungen der Versagenszeitpunkt angekündigt wurde.

Die ab der 30. Minute Branddauer annähernd unverändert gebliebenen Durchbiegungen (s. Bild 3.28) wurden durch die Entlastung des Feldbereichs infolge der vergrößerten Stützmomente verursacht. Gleichzeitig wurde bei Annäherung an den Versagenszeitpunkt durch die nahezu konstanten Durchbiegungen verhindert, daß die geringer werdende Spanngliedkraft durch eine Vergrößerung des Hebelarms der inneren Kräfte ausgeglichen wurde. Mit dem Bruch des Spanngliedes verlor der Prüfkörper einen wesentlichen Teil seiner Tragfähigkeit; die Feuerwiderstandsdauer wird deshalb mit dem Zeitpunkt des Spanngliedversagens gleichgesetzt. In der Tabelle 3.14 sind die beim Prüfkörper VoV-2 zum Versagenszeitpunkt gemessenen Spannstahl-Temperaturen und Spannstahl-Spannungen den nach DIN 4102 Teil 4 maßgebenden Bemessungsgrößen gegenübergestellt. Nicht verglichen werden kann die im Brandversuch gemessene Feuerwiderstandsdauer mit der in der Bemessung angestrebten Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten, weil der brandschutztechnischen Bemessung eine Spannstahlspannung von $\sigma_z = 0,70 \cdot \beta_z$ zugrunde lag, während die Prüfkörper mit $\sigma_z \approx 0,61 \cdot \beta_z$ vorgespannt wurden und außerdem die Erwärmung gegenüber den angenommenen Werten etwas verzögert verlief.

| Prüfkörper | Spannglied | Brandversuch | | | nach DIN 4102 Teil 4 | |
|------------|------------|----------------|--|------------------|--|----------------|
| | | t_u [min] | $\frac{\sigma_z(t_u)}{\beta_z(20^\circ\text{C})}^{2)}$ | T_u 1) [°C] | $\frac{\sigma_z(t_o)}{\beta_z(20^\circ\text{C})}^{2)}$ | crit T [°C] |
| VoV-2 | I | 161 | 0,56 | 381 | 0,618 | 327 |
| | II | | 0,48 | 383 | 0,614 | 329 |

1) Spannstahl-Temperatur in Feldmitte

2) $\beta_z(20^\circ\text{C}) = 1900 \text{ N/mm}^2$

Tabelle 3.14: Versagenszeitpunkt, -temperatur und Spannstahlspannung für den Prüfkörper VoV-2; Vergleich mit den Bemessungswerten nach DIN 4102 Teil 4

3.4.3 Andere Arbeiten

In jüngster Vergangenheit sind in den Niederlanden [25] und in Belgien [26] vergleichbare Brandversuche an durchlaufenden Plattenstreifen mit Vorspannung ohne Verbund durchgeführt worden. Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung waren im wesentlichen vergleichbar mit den im Abschnitt 3.2 beschriebenen Verhältnissen.

In den Niederlanden wurde ein Brandversuch durchgeführt, bei dem neben den zwei verbundlos geführten Spanngliedern als schlaffe Längsbewehrung nur über den Auflagern eine kurze, obere Bewehrung angeordnet war.

Die Spannstahl-Spannung betrug bei Versuchbeginn $\sigma_z = 0,63 \cdot \beta_z$; sie stieg nach 40 Minuten Branddauer auf $\sigma_z = 0,73 \cdot \beta_z$ an und fiel dann bis zum Bruch des ersten Spannglieds in der 57. Minute auf $\sigma_z = 0,57 \cdot \beta_z$ ab. Die Temperatur im Spannglied betrug zu diesem Zeitpunkt 425 °C. Das zweite Spannglied, das sich deutlich langsamer erwärmte, brach nach 62 Minuten Branddauer bei einer Temperatur von 375 °C und einer Spannung von $\sigma_z = 0,61 \cdot \beta_z$. Der Bruch der Spannglieder erfolgte schlagartig, ohne Ankündigung durch größer werdende Durchbiegungen. Die Ergebnisse des Brandversuchs werden in [25] wie folgt zusammengefaßt: Um den Bruch eines mit $\sigma_z = 0,6 \cdot \beta_z$ vorgespannten, verbundlos geführten Spanngliedes in der vorgesehenen Feuerwiderstandsdauer zu verhindern, muß durch ausreichende Betondeckung ein Ansteigen der Spannstahl-Temperatur auf über 380 °C verhindert werden. Außerdem muß durch eine ausreichend weit ins Feld geführte, obere Stützbewehrung eine übermäßige Rißbildung im Auflagerbereich auf der Plattenoberseite verhindert werden.

Im Rahmen der belgischen Versuche wurde u. a. der Einfluß von Menge und Anordnung der schlaffen Bewehrung studiert. Im Versuchsbericht [26] wird für alle Spannglieder eine Vorspannkraft von $V_0 = 127 \text{ kN}$ angegeben, es fehlen detaillierte Angaben über die Spannstahlgüte, -festigkeit und -querschnittsfläche. Während der Brandversuche wurde eine Vergrößerung der Vorspannkraft von maximal 4 % gemessen; Angaben über die Größe der Vorspannkraft zum Versagenszeitpunkt werden in [26] nicht gemacht.

In der Zusammenfassung der Versuchsergebnisse wird mitgeteilt, daß es zur Erzielung einer vorgesehenen Feuerwiderstandsdauer nicht ausreicht, die

Betondeckung der Spannglieder festzulegen, sondern daß infolge des komplexen Zusammenwirkens von Spannglied, Beton und schlaffer Bewehrung für die untere schlaffe Bewehrung zusätzliche Angaben über den erforderlichen Bewehrungsgrad erforderlich sind. Für die obere schlaffe Bewehrung im Auflagerbereich wird vorgeschlagen, möglichst kleine Durchmesser zu verwenden und die Bewehrung mindestens bis $0,25 \cdot l$ (l ist die Stützweite des angrenzenden Feldes) über das Auflager hinaus ins angrenzende Feld zu führen. Alle Bemessungsvorschläge gelten nur für Bauteile mit gleichen konstruktiven und statischen Randbedingungen, wie bei den geprüften Bauteilen; eine Extrapolation auf z. B. andere Querschnittsabmessungen wird als nicht möglich bezeichnet, weil dafür ausreichend abgesicherte Versuchsdaten fehlen.

3.5 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde das Trag- und Verformungsverhalten von zwei Plattenstreifen mit Vorspannung ohne Verbund unter Brandbeanspruchung gemäß DIN 4102 untersucht. Die Prüfkörper wurden als Einfeldträger mit beidseitig angrenzendem Kragarm geprüft. Die Kragarme wurden elastisch eingespannt, um eine Durchlaufwirkung über den Auflagern zu erzielen. Die Belastung des beflamten Mittelfeldes wurde variiert.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse läßt folgende Schlußfolgerungen zu:

1. Die Größe der Verkehrslast im beflamten Deckenfeld blieb nahezu ohne Einfluß auf die Veränderung der Spannstahl-Spannung während des Brandversuchs.¹⁾
2. Der Tragfähigkeitsverlust trat durch schlagartigen Bruch eines Spanngliedes ein.
3. Der Bruch des Spannglieds wurde nicht durch große Verformungen angekündigt.

1) Der Brandversuch, bei dem das beflamte Feld ohne Verkehrslast war (VoV-1), wurde nach 124 Minuten Branddauer vor Erreichen des Versagenszustandes abgebrochen. Die bis dahin gemessene Veränderung der Spannstahlspannung zeigt nur sehr geringe Unterschiede zu der Spannstahlspannung des Brandversuchs, bei dem das beflamte Feld mit einer Verkehrslast von 10 kN/m^2 belastet wurde (VoV-2).

4. Der Spannungsabfall im Spannstahl betrug kurz vor dem Bruch rund 20 % der Spannung bei Versuchsbeginn; die Spannstahl-Spannung änderte sich von Versuchsbeginn $\sigma_z = 0,61 \cdot \beta_z$ auf $\sigma_z = 0,48 \cdot \beta_z$ erst kurz vor dem Bruch des Spannglieds. Zur Verallgemeinerung dieser Aussage, z. B. zur Bestimmung der kritischen Temperatur für die brandschutztechnische Bemessung in DIN 4102 Teil 4, wären nachfolgende Einflußparameter zu untersuchen:

- statisches System
- Spanngliedführung
- Menge und Anordnung der schlaffen Bewehrung.

Die beiden durchgeführten Brandversuche zum Trag- und Verformungsverhalten von Plattenstreifen mit Vorspannung ohne Verbund zeigen, daß weitere experimentelle Untersuchungen erforderlich sind. Diese sollten folgenden Parametern - zusätzlich zu den unter Pkt. 4 genannten - nachgehen:

- horizontale Dehnbehinderung des beflamnten Deckenfeldes durch angrenzende, nicht beflamnte Deckenbereiche,
- Querschnittsausbildung (Platte, Balken),
- Einfluß der Quervorspannung,
- Einfluß der Verformung der gedachten Auflagerlinie.

4. Literatur

- [1] DIN 4227 Teil 6, Spannbeton, Bauteile mit Vorspannung ohne Verbund, März 1981, Vornorm.
- [2] Matt, P.: Vorspannung ohne Verbund - Beispiele und Möglichkeiten der Anwendung; Beton- und Stahlbetonbau 9/1981.
- [3] DIN 4102 Teil 4, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, März 1981.
- [4] VSL Monolithenspannverfahren ohne Verbund. Zulassungsbescheid vom 9. Februar 1981, Institut für Bautechnik, Berlin.
- [5] Spannverfahren "DYWIDAG-Einzelspannglied ohne Verbund aus Litze $\varnothing 15,3$ mm (0,6"); Zulassungsbescheid vom 9. Febr. 1981, Institut für Bautechnik, Berlin.
- [6] DIN 50 017 Beanspruchung in Schwitzwasserklimaten, Dezember 1963.
- [7] DIN 50 018 Beanspruchung mit Kondenswasser-Wechselklima mit schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre, März 1977 (Entwurf).
- [8] Haksever, A., Krampf, L.: Möglichkeiten einer nachträglichen Beurteilung der in einem Betonbauteil während eines Schadenfeuers aufgetretenen Temperaturen. Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1980, durchgeführt im Auftrag des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Az.: B I 7 - 81 07 05 - 273); Veröffentlichung demnächst im Deutschen Ausschuß für Stahlbeton, 1983.
- [9] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), "Bruchwiderstand und Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken", Norm 162, Richtlinie 34, Zürich, 1976.
- [10] ACI Standard "Building Code Requirements for Reinforced Concrete". ACI 318-77, July 1978.

- [11] Tentative Recommendations for the Corrosion Protection of Unbonded Tendons. Ad-hoc Committee of the FIP Commission on Prestressing Steels and Systems; PCI Journal/January-February 1983.
- [12] DIN 1045 Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, Dezember 1978.
- [13] Wölfel, E.: Flachdecken mit Vorspannung ohne Verbund, Bauingenieur 55, 1980.
- [14] Kordina, K.; Richter, E.: Rechnerische Untersuchungen über die Veränderungen im Tragverhalten von brandbeanspruchten Spannbetonbindern infolge höherer zulässiger Spannstahlspannungen. Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1983, durchgeführt im Auftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Az.: B I 7 - 81 07 05 - 265), unveröffentlicht.
- [15] DIN 4102 Teil 2, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen; September 1977.
- [16] ISO: "Fire Resistance Tests - Elements of building construction". International Standard 834, November 1975.
- [17] Schnorr Handbuch für Tellerfedern, Herausgeber Adolf Schnorr GmbH + Co. KG, Sindelfingen, Ausgabe 1981.
- [18] Ehm, H.: Rechnerische Ermittlung der Erwärmungsvorgänge von brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen. DAfStb., Heft 230, Teil 2, 1975.
- [19] Schneider, U., Dreyer, R.: Untersuchung über die Feuerwiderstandsdauer von Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund bei Brandbeanspruchung. Bericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1971, unveröffentlicht.
- [20] Richter, E.: Vorspannung ohne Verbund im Brandfall. Beitrag in: Brandverhalten von Bauteilen. 3. öffentl. Forschungskolloquium des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen" der Technischen Universität Braunschweig, Universität Karlsruhe, 1982.

- [21] Kupfer, H.: Bemessung von Spannbetonbauteilen - einschließlich teilweiser Vorspannung. Abgedruckt im Betonkalender 1983, Teil 1. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München, 1983.

- [22] Kordina, K.: Untersuchung der Möglichkeit des Einsatzes der Vorspannung ohne Verbund. Forschungsbericht 1983, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig.

- [23] Trost, H.: Vorspannung ohne Verbund - Versuche und deren Ergebnisse. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 9, 1981.

- [24] Rüschi, H., Kordina, K., Zelger, E.: Bruchsicherheit bei Vorspannung ohne Verbund. Heft 130 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, 1959.

- [25] Gantvoort, E.J.: The Behaviour of a continuous Slab, prestressed by Unbonded Tendons during a Fire-Test. Information Sheet, Institute TNO for Building Materials and Building Structures, 1979.

- [26] Herberghen, P.v.; Damme, M.v.: Fire Resistance of Post-Tensioned continuous Flat Floor Slabs with Unbonded Tendons. Document ISO/TC 92/SC 2/WG 2 N 65, 1983.

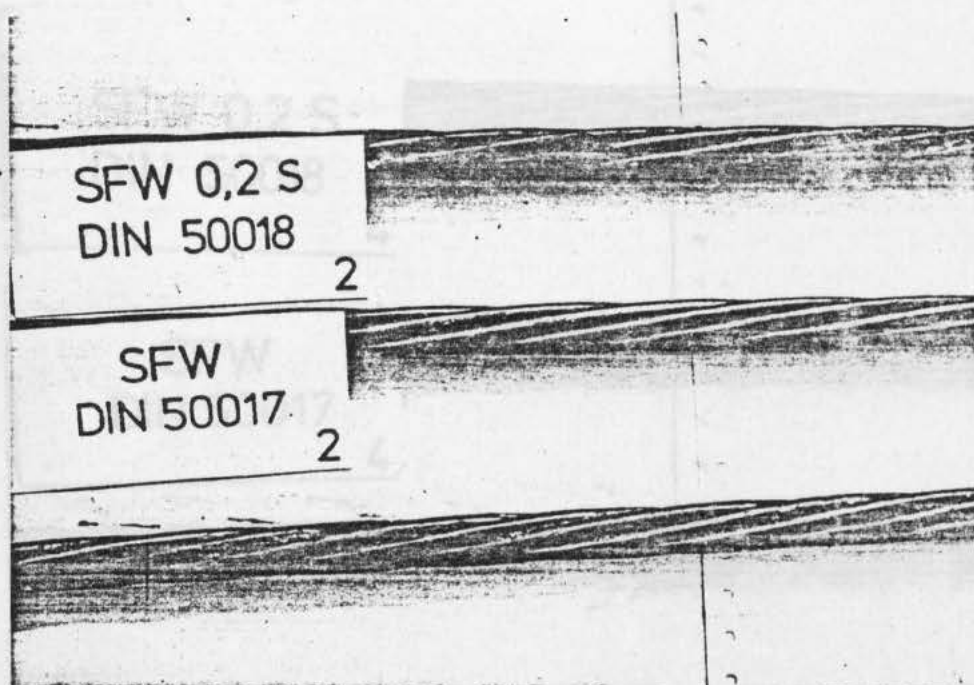
- [27] Kordina, K., Meyer-Ottens, C.: Beton-Brandschutz-Handbuch, Beton-Verlag GmbH., Düsseldorf, 1981.

Verzeichnis der Anlagen

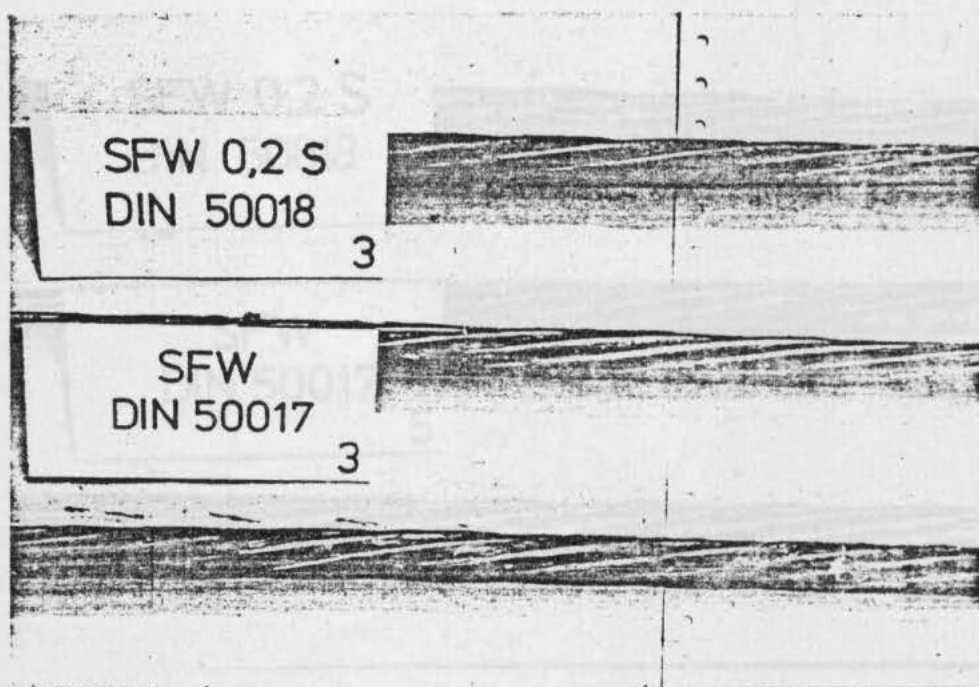
- Anlage 1: Spannstahtlitzten nach der Temperatur- und Klimabeanspruchung:
Erwärmungsversuch 2
- Anlage 2: Spannstahtlitzten nach der Temperatur- und Klimabeanspruchung:
Erwärmungsversuch 3
- Anlage 3: Spannstahtlitzten nach der Temperatur- und Klimabeanspruchung:
Erwärmungsversuch 4
- Anlage 4: Spannstahtlitzten nach der Temperatur- und Klimabeanspruchung:
Erwärmungsversuch 5
- Anlage 5: Spannstahtlitzten nach der Temperatur- und Klimabeanspruchung:
Erwärmungsversuch 6
- Anlage 6: Brandraumtemperaturen im Versuch VoV-1
- Anlage 7: Brandraumtemperaturen im Versuch VoV-2
- Anlage 8: Temperaturentwicklung am Spannglied I, Prüfkörper VoV-1
- Anlage 9: Temperaturentwicklung am Spannglied II, Prüfkörper VoV-1
- Anlage 10: Temperaturentwicklung am Spannglied I, Prüfkörper VoV-2
- Anlage 11: Temperaturentwicklung am Spannglied II, Prüfkörper VoV-2
- Anlage 12: Temperaturentwicklung an der schlaffen Bewehrung
- Anlage 13: Prüfkörper VoV-2 nach dem Brandversuch
- Anlage 14: Horizontale Verformungen am Kragarmende auf der Seite des
verschieblichen Auflagers, Prüfkörper VoV-1
- Anlage 15: Horizontale Verformungen am Kragarmende auf der Seite des
unverschieblichen Auflagers, Prüfkörper VoV-1

Anlage 16: Horizontale Verformungen am Kragarmende auf der Seite des verschieblichen Auflagers, Prüfkörper VoV-2

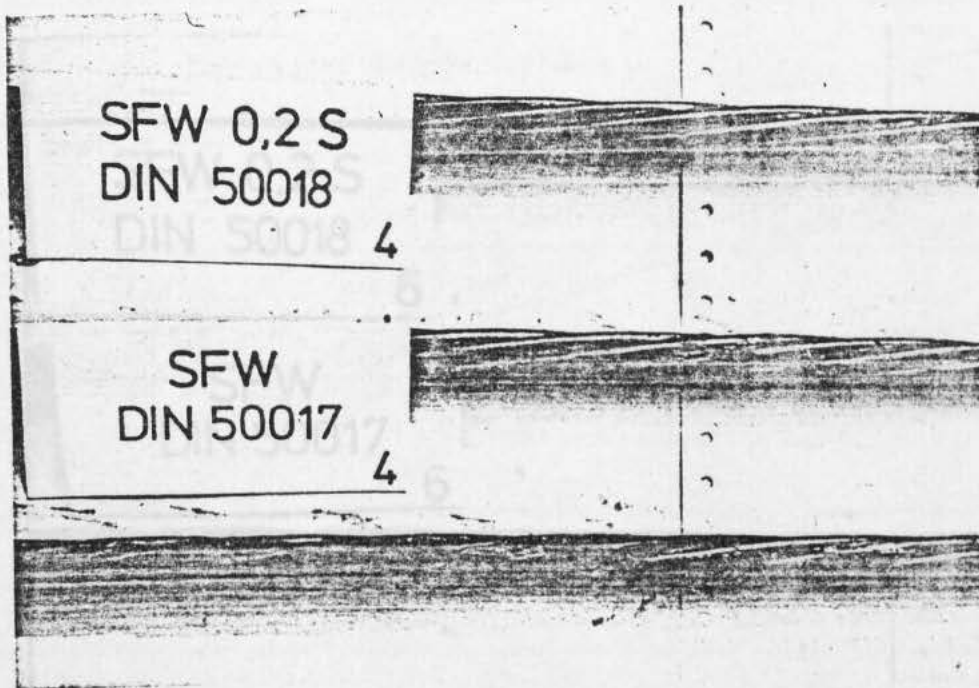
Anlage 17: Horizontale Verformungen am Kragarmende auf der Seite des unverschieblichen Auflagers, Prüfkörper VoV-2



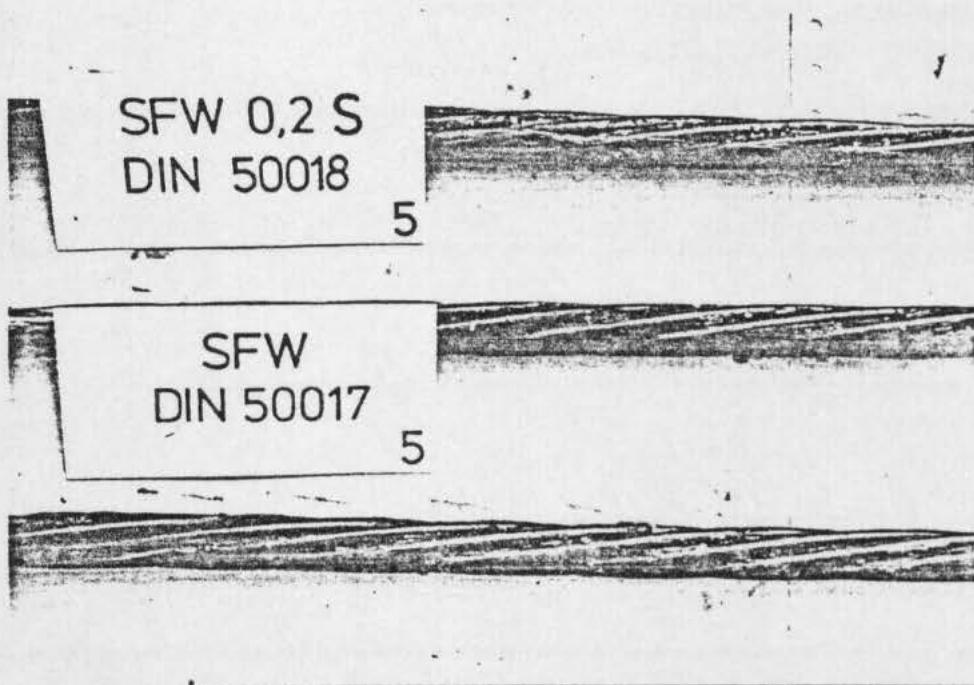
Anlage 1: Spannstahllitzen nach der Temperatur- und Klimabeanspruchung:
Erwärmungsversuch 2



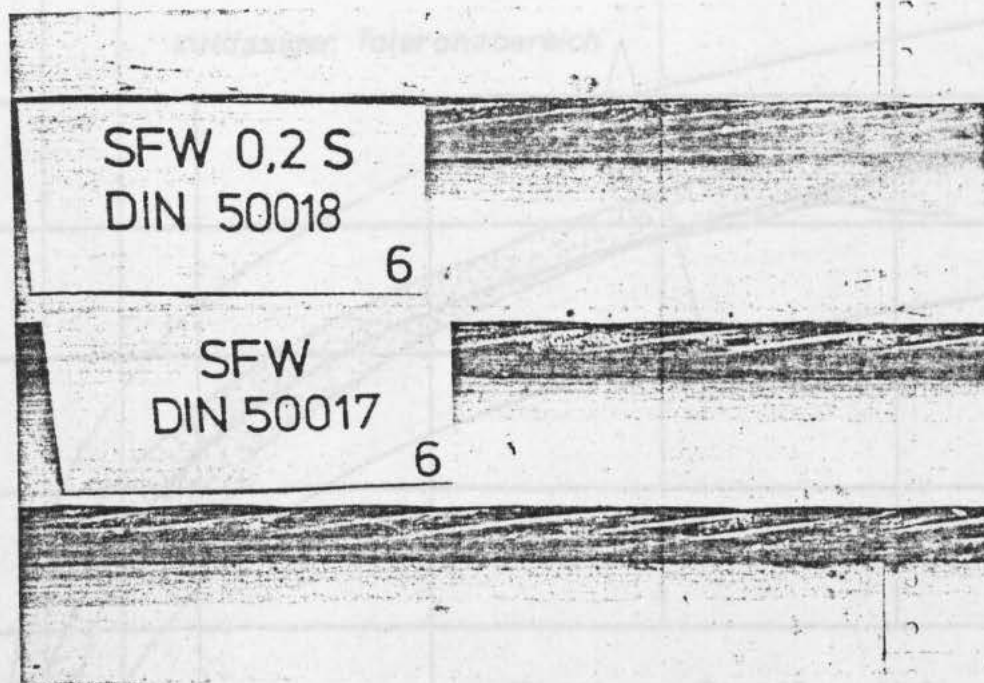
Anlage 2: Spannstahllitzen nach der Temperatur- und Klimabeanspruchung:
Erwärmungsversuch 3



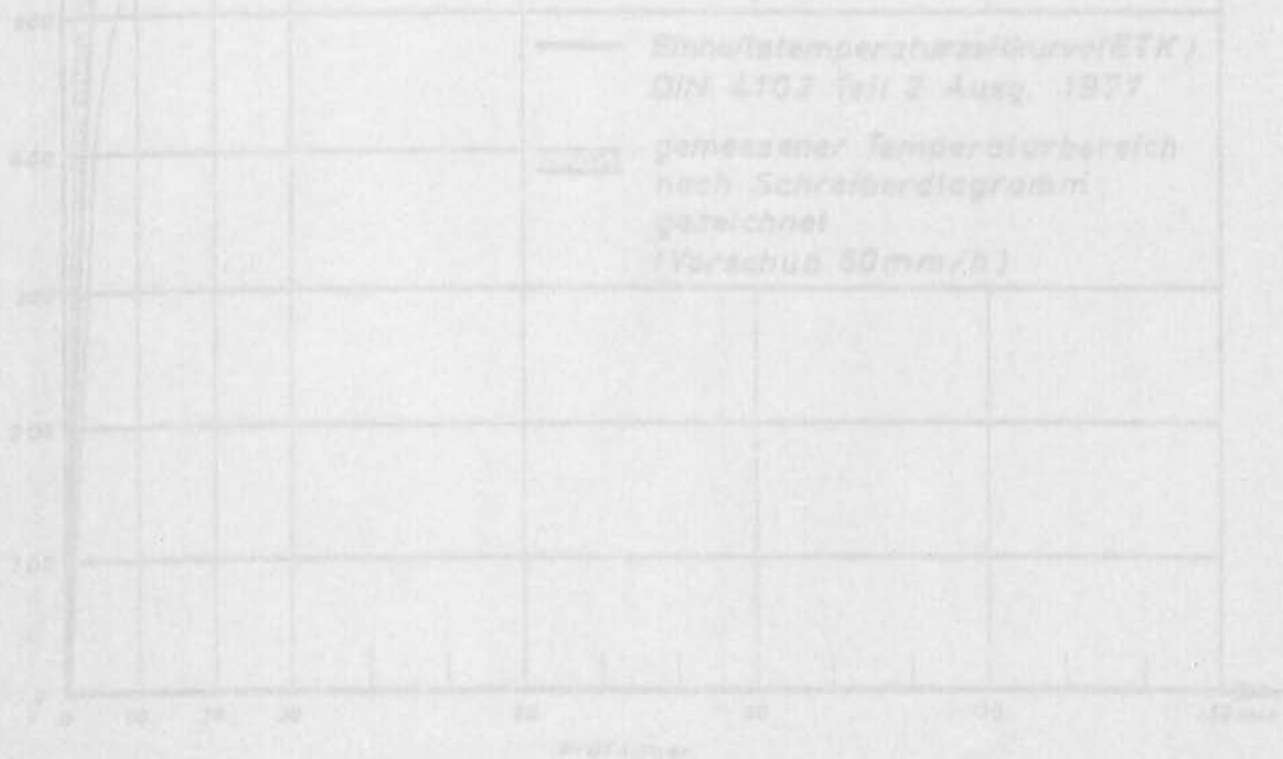
Anlage 3: Spannstahllitzen nach der Temperatur- und Klimabeanspruchung:
Erwärmungsversuch 4



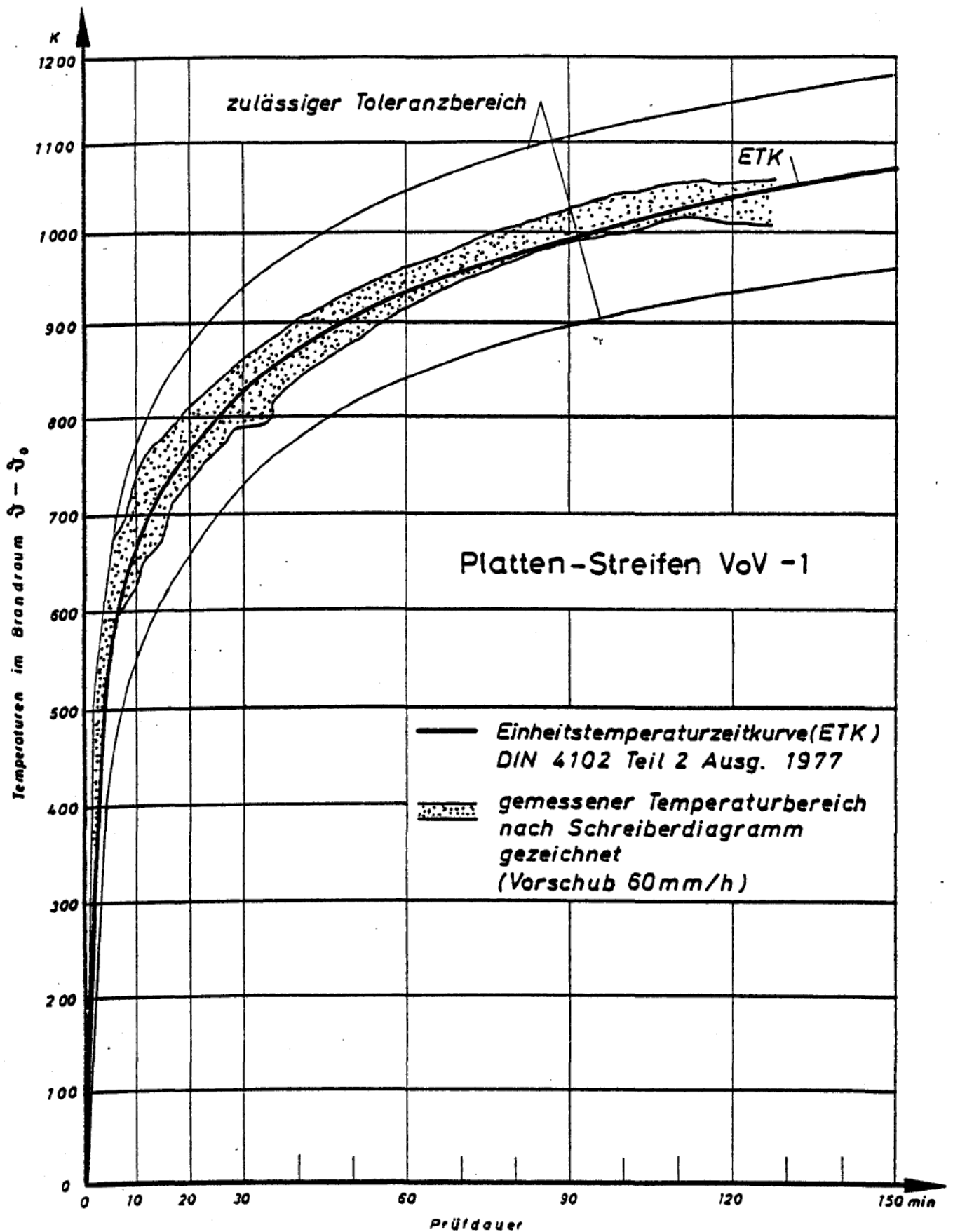
Anlage 4: Spannstahllitzen nach der Temperatur- und Klimabeanspruchung:
Erwärmungsversuch 5



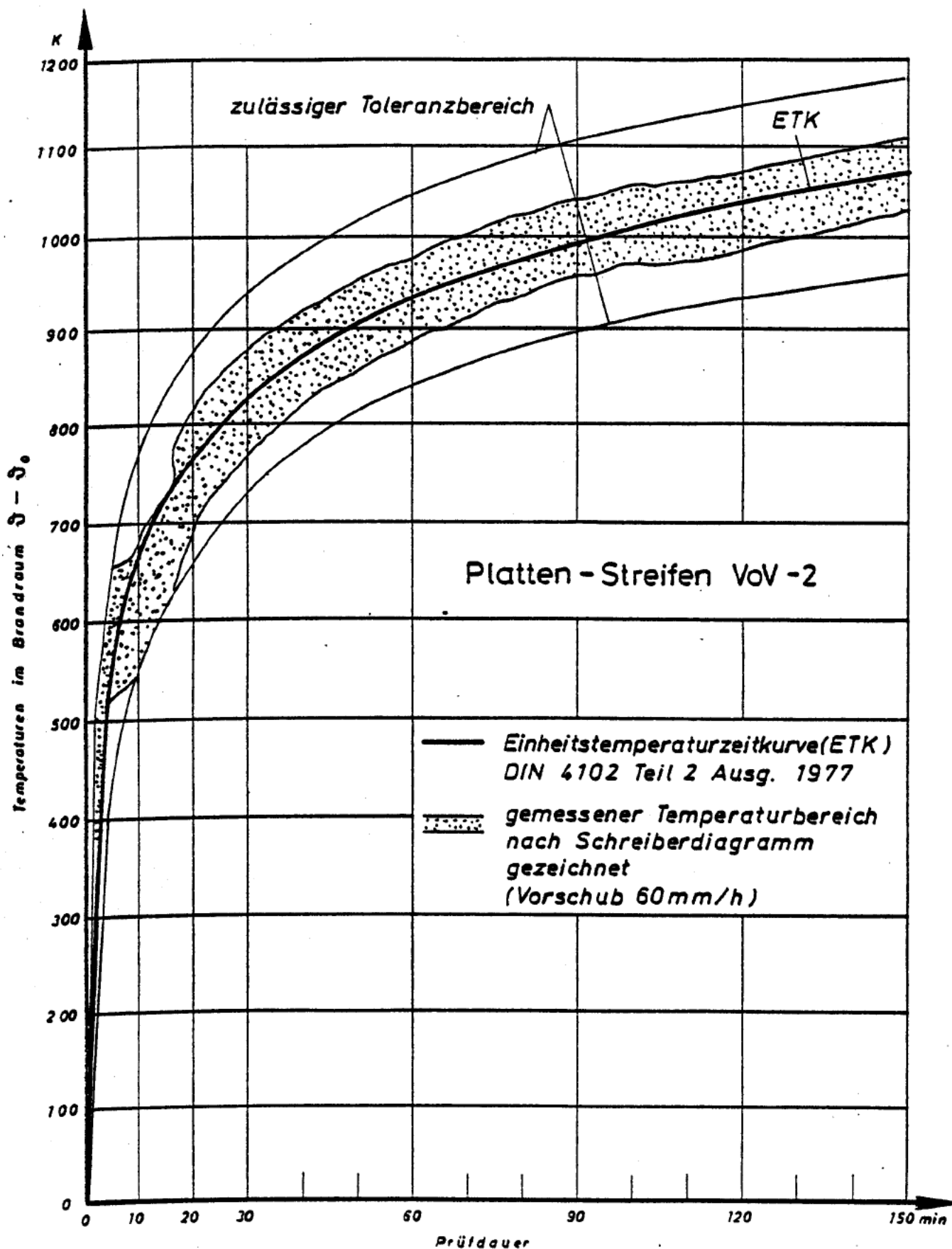
Anlage 5: Spannstahllitzen nach der Temperatur- und Klimabeanspruchung:
Erwärmungsversuch 6



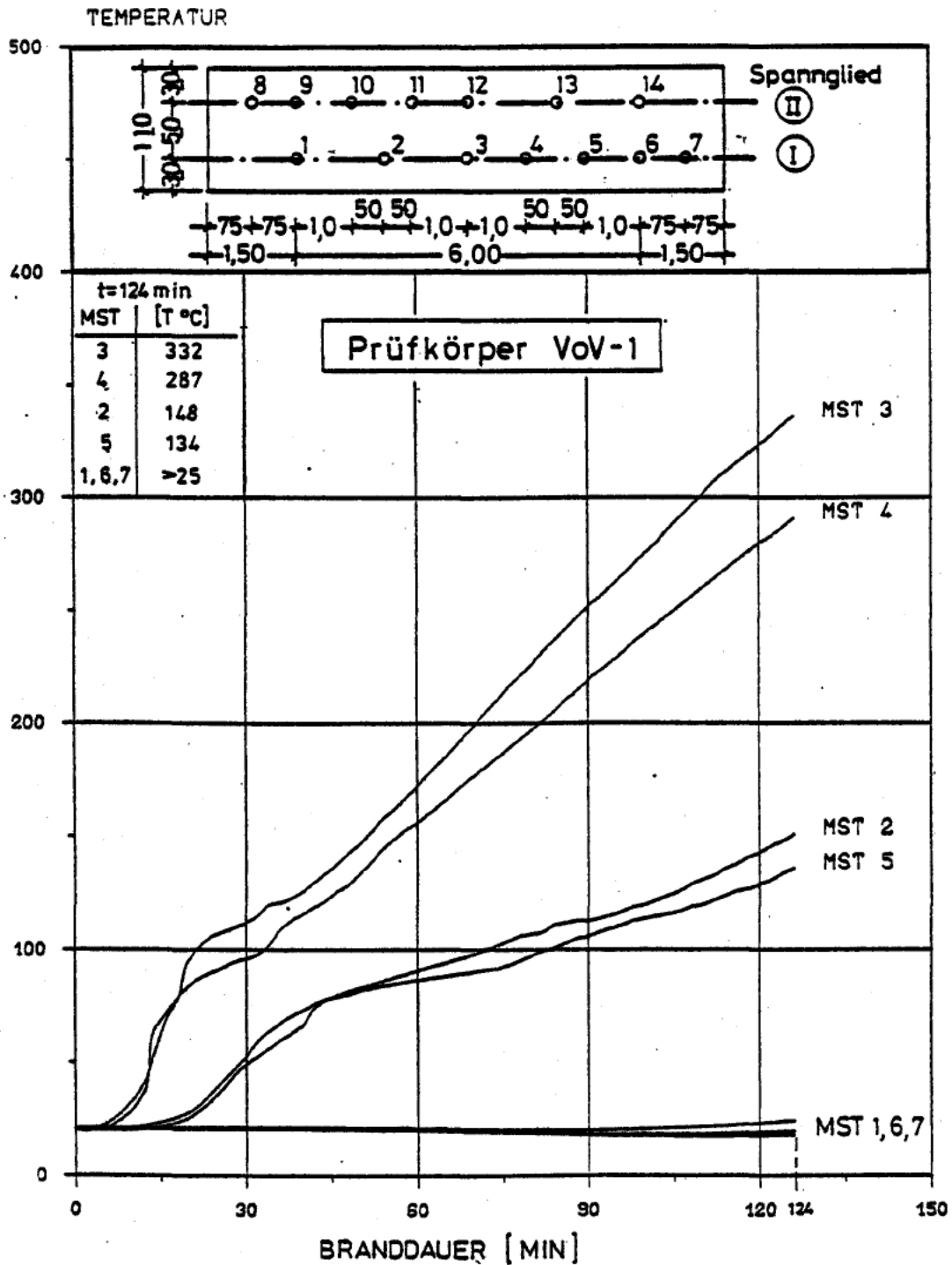
Anlage 5: Brandversuchsergebnisse des Versuches VbV-1



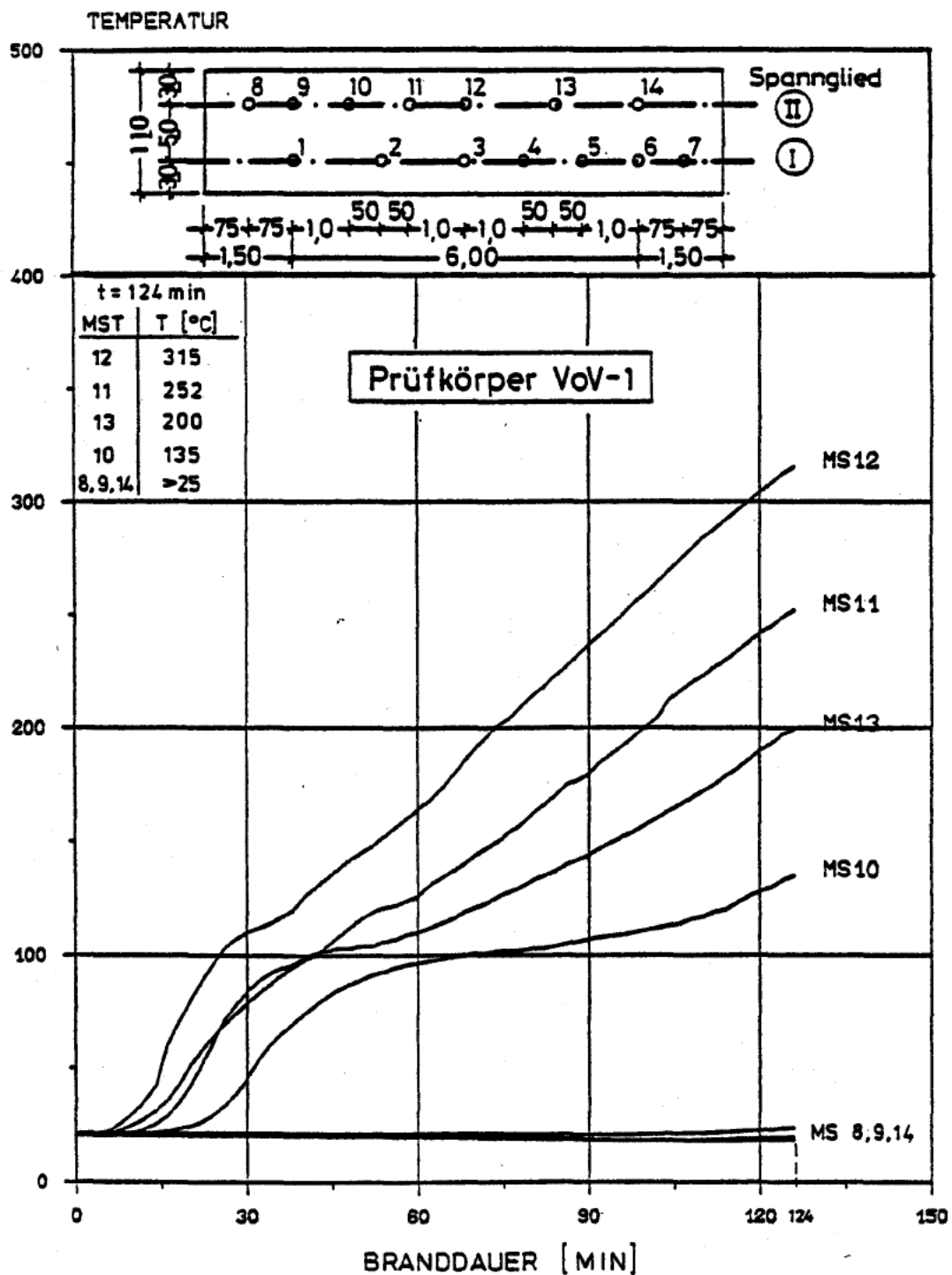
Anlage 6: Brandraumtemperaturen im Versuch VoV-1



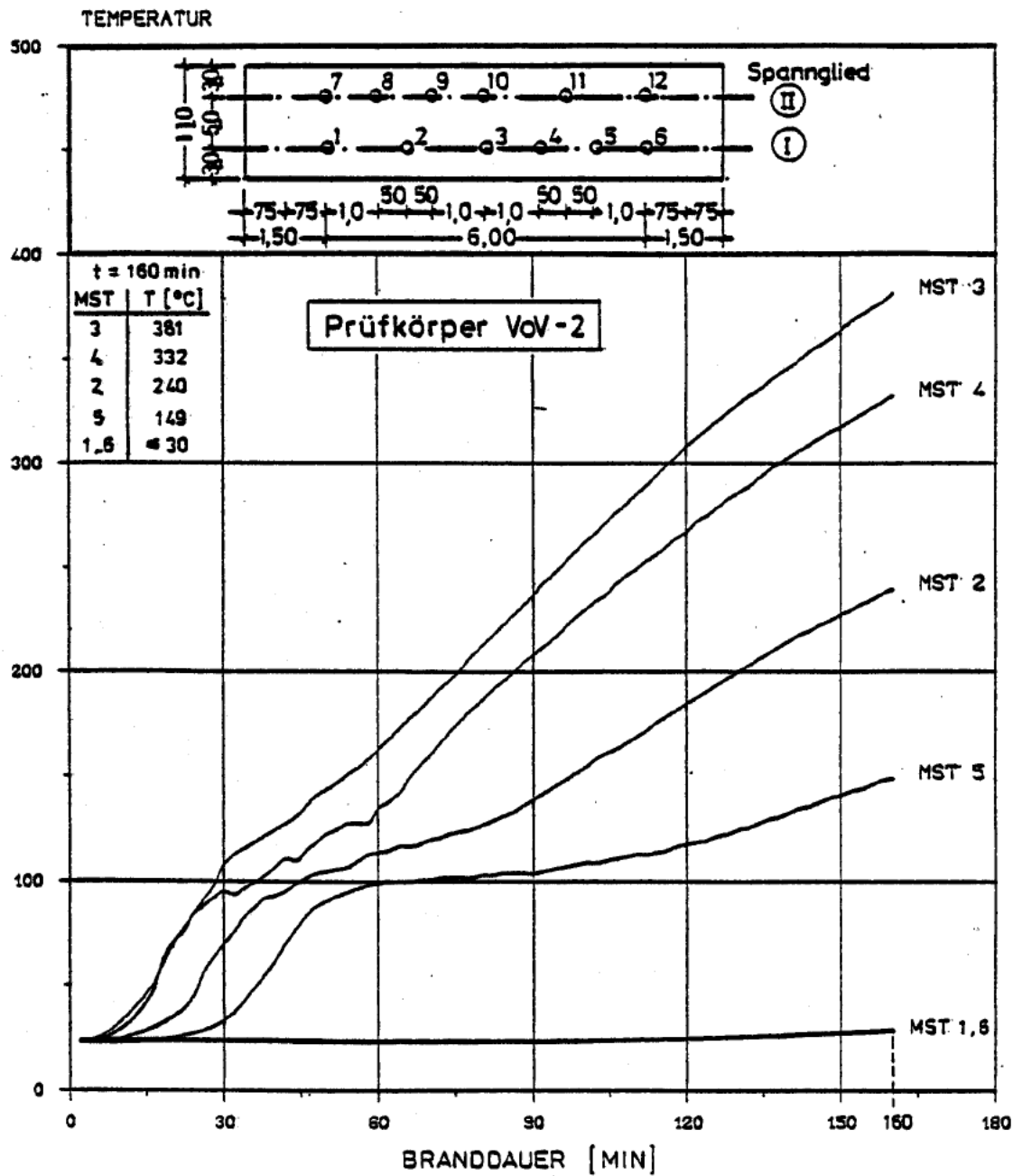
Anlage 7: Brandraumtemperaturen im Versuch VoV-2



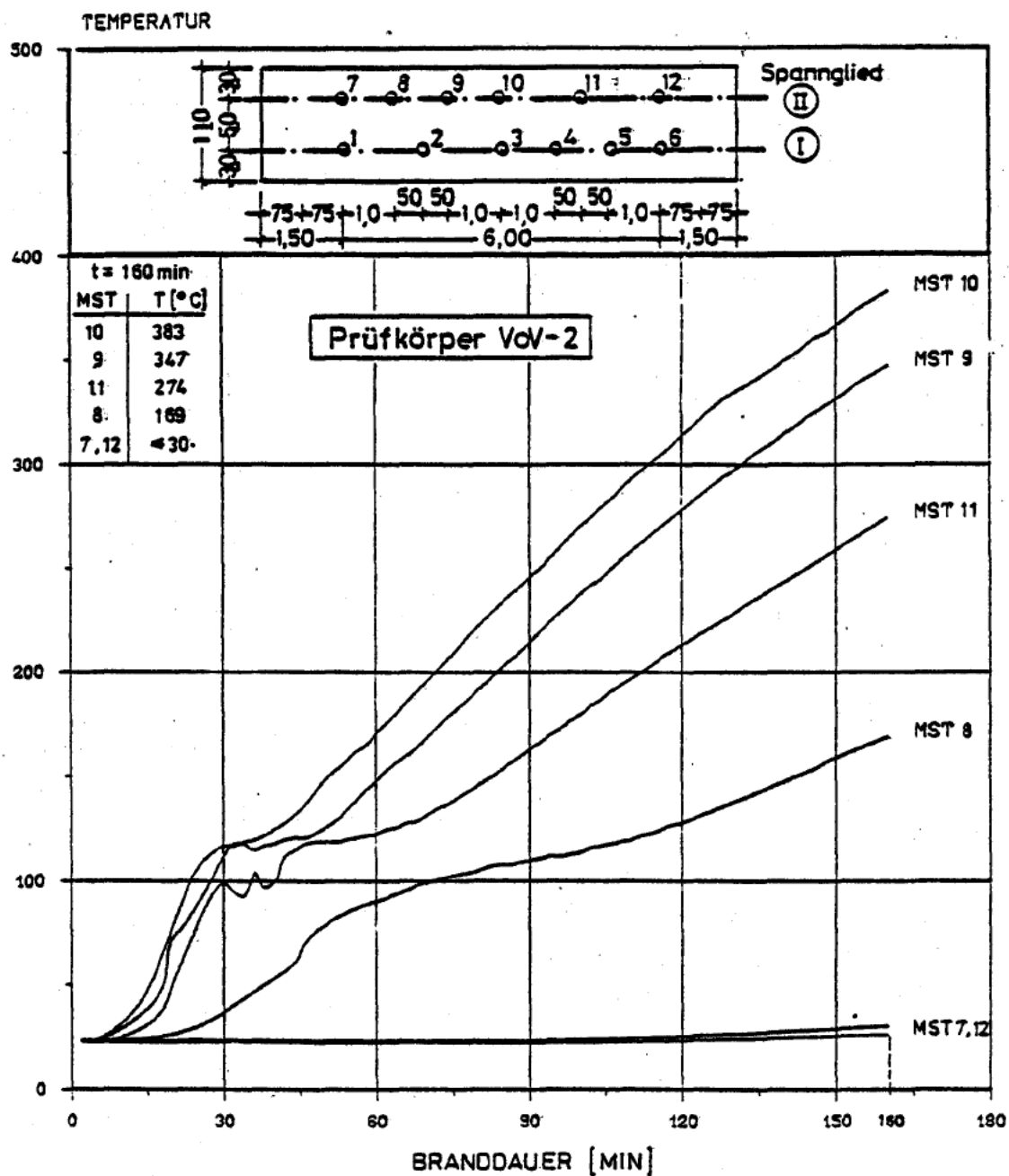
Anlage 8: Temperaturentwicklung am Spannglied I,
Prüfkörper VoV-1



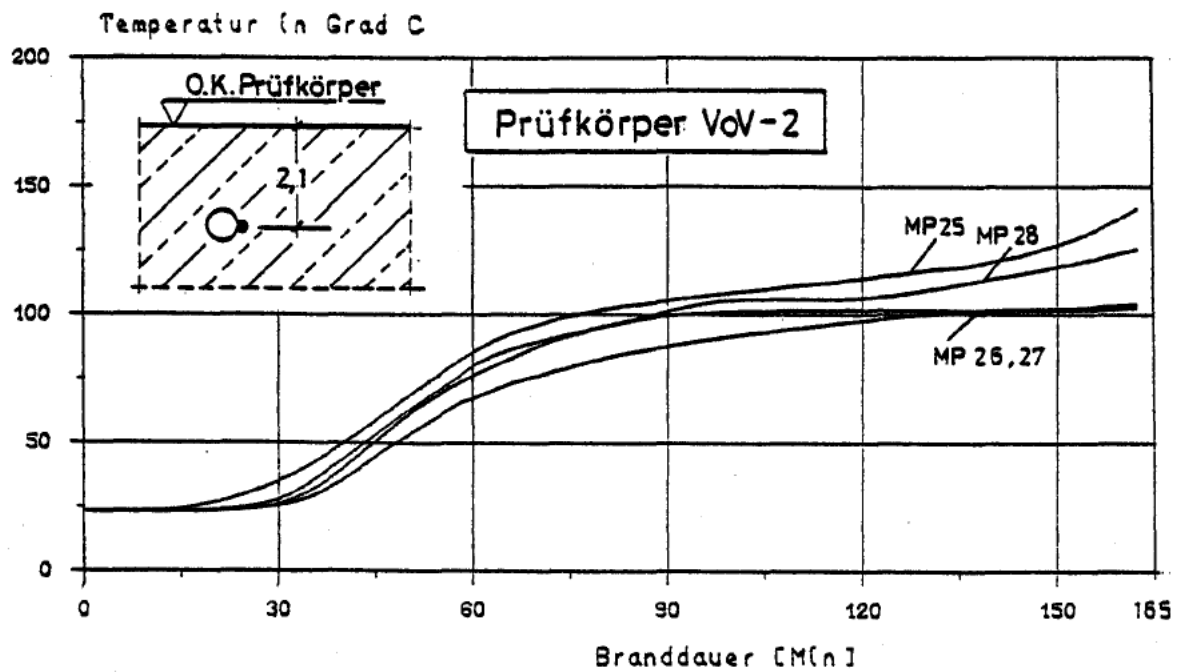
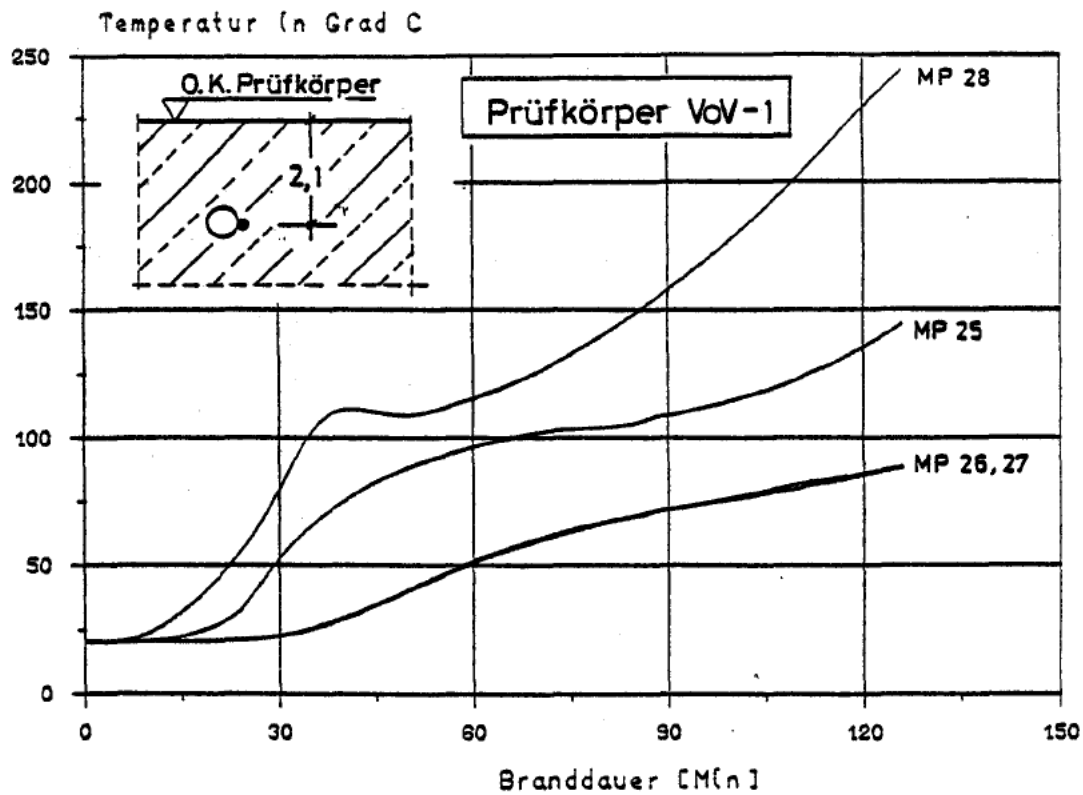
Anlage 9: Temperaturentwicklung am Spannglied II,
Prüfkörper VoV-1



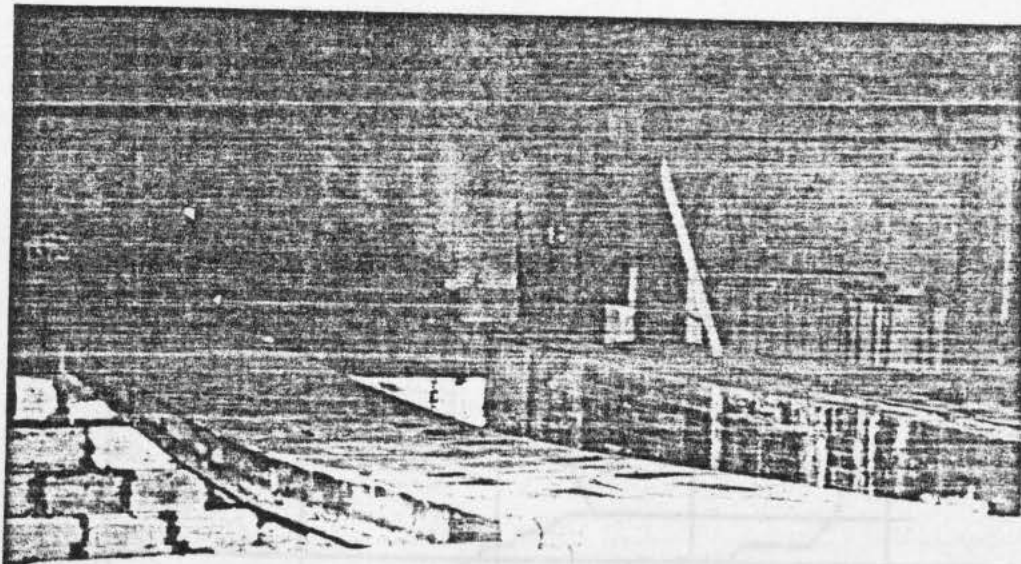
Anlage 10: Temperaturentwicklung am Spannglied I,
Prüfkörper VoV-2



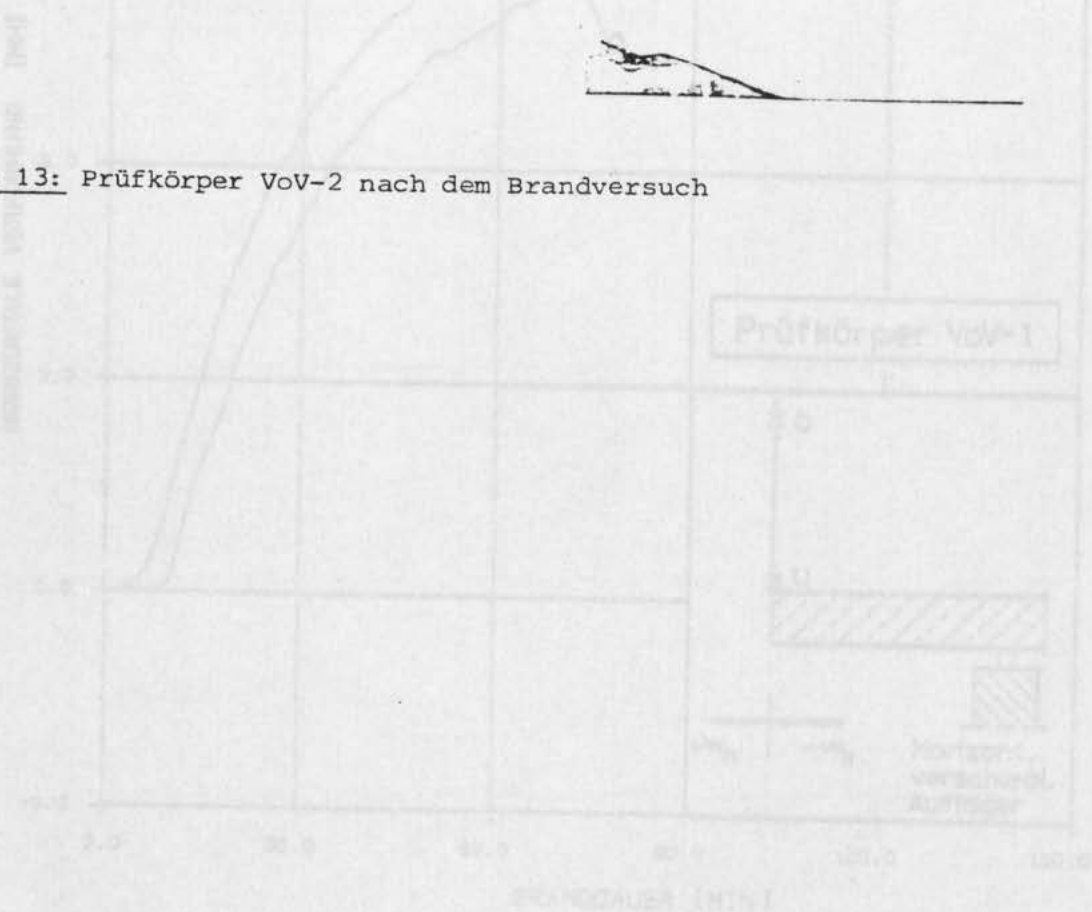
Anlage 11: Temperaturentwicklung am Spannglied II,
Prüfkörper VoV-2



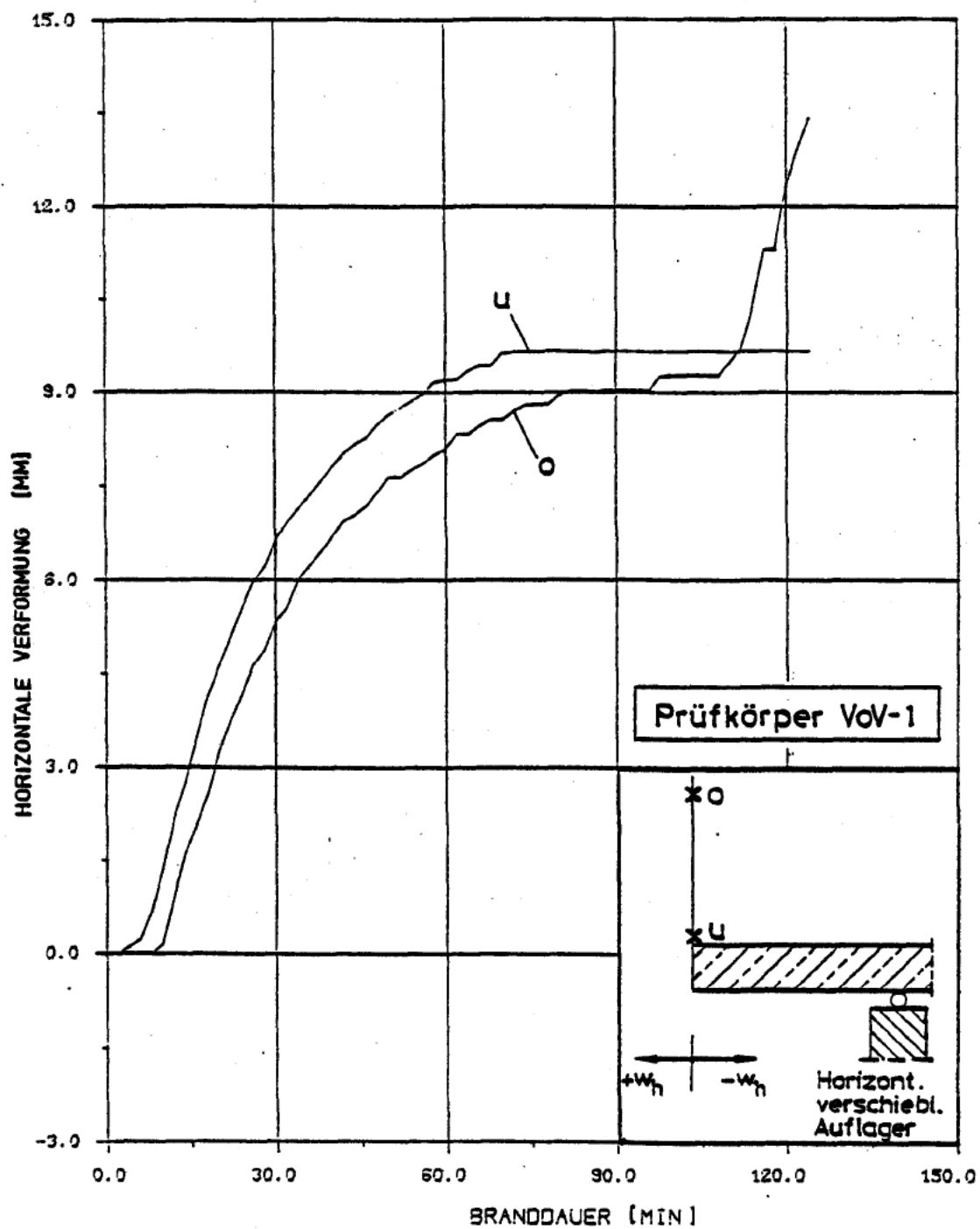
Anlage 12: Temperaturentwicklung an der schlaffen Bewehrung



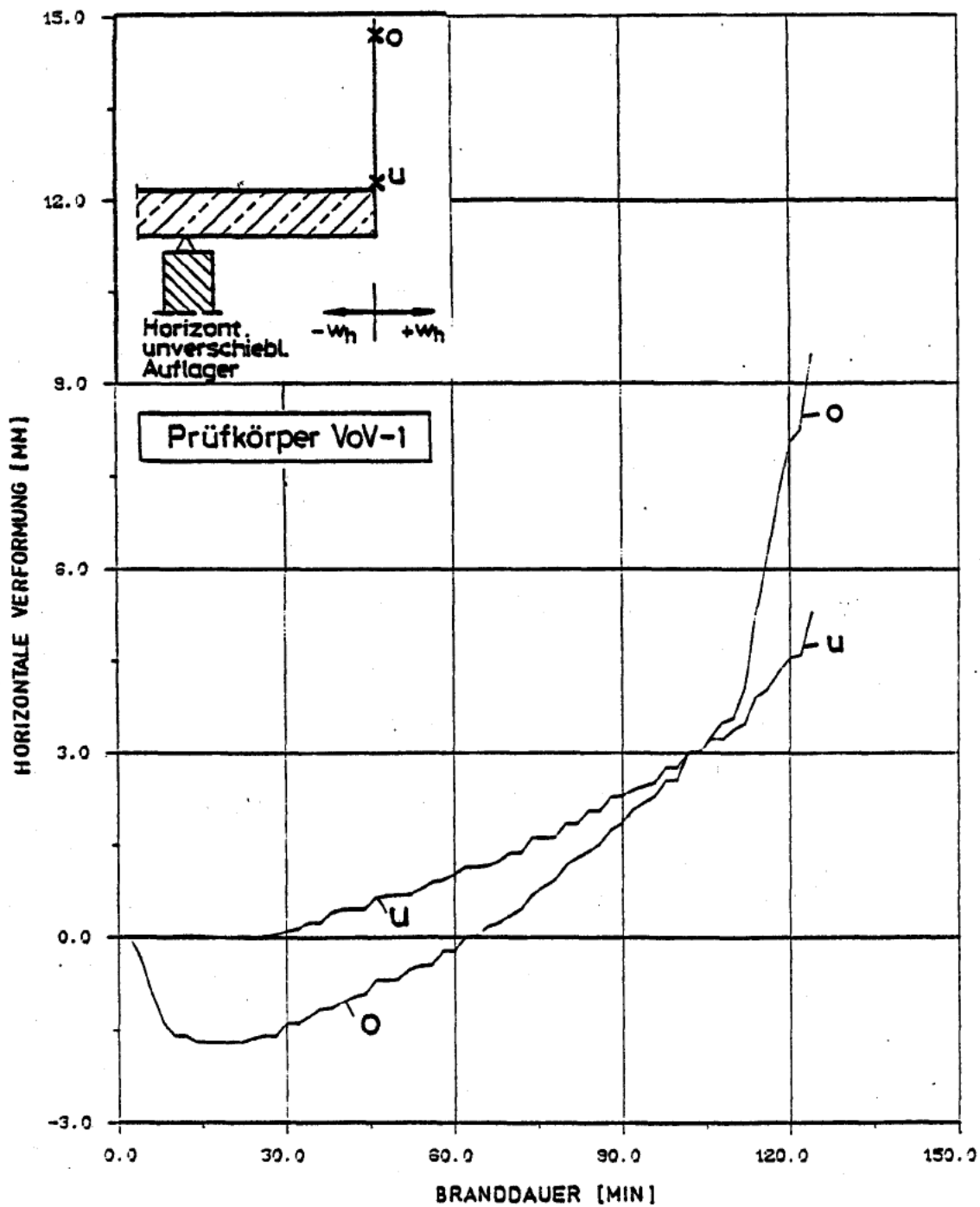
Anlage 13: Prüfkörper VoV-2 nach dem Brandversuch



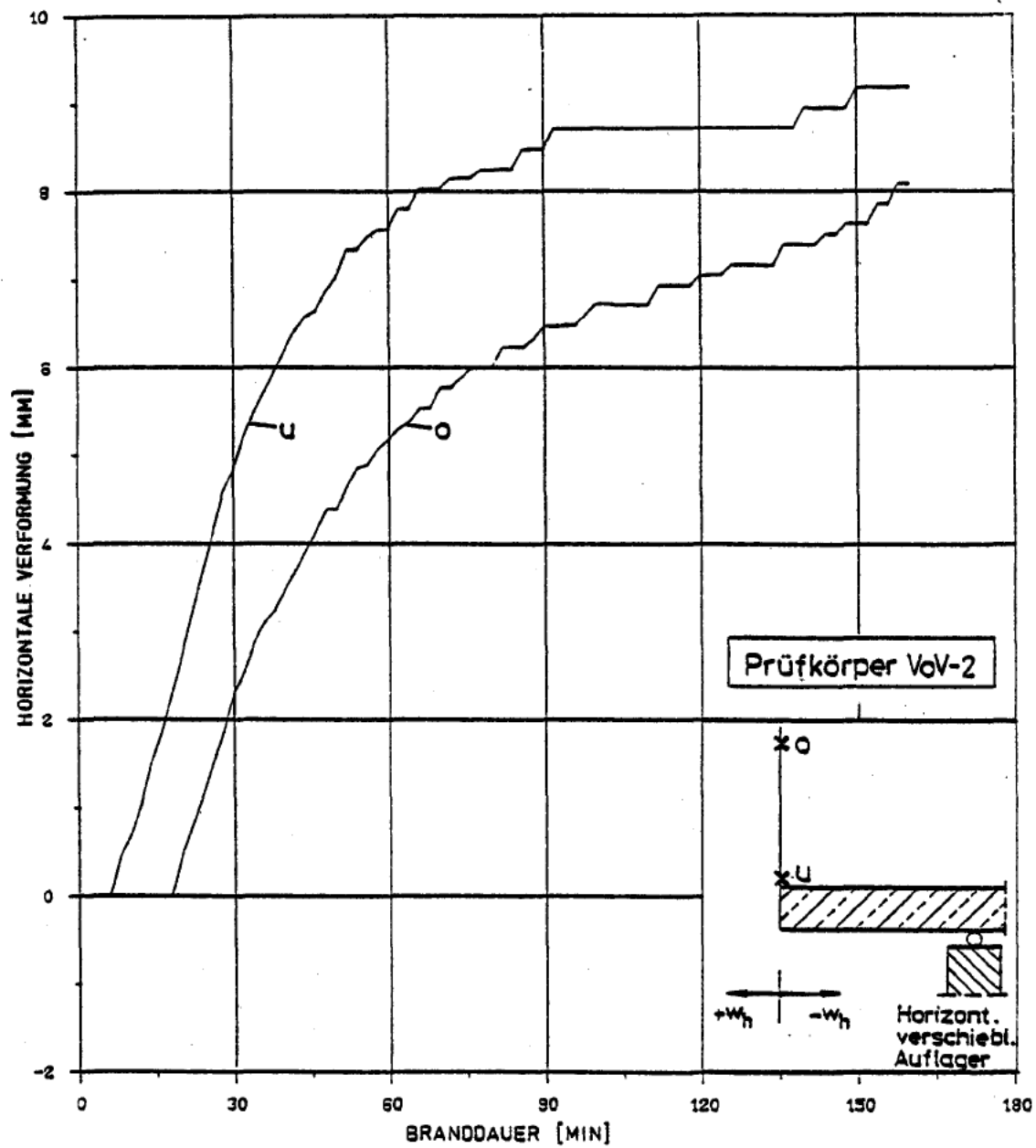
Anlage 14: Horizontale Verformungen an Kragarmende auf der Seite des verformungsabhängigen Auflagers, Prüfkörper VoV-1



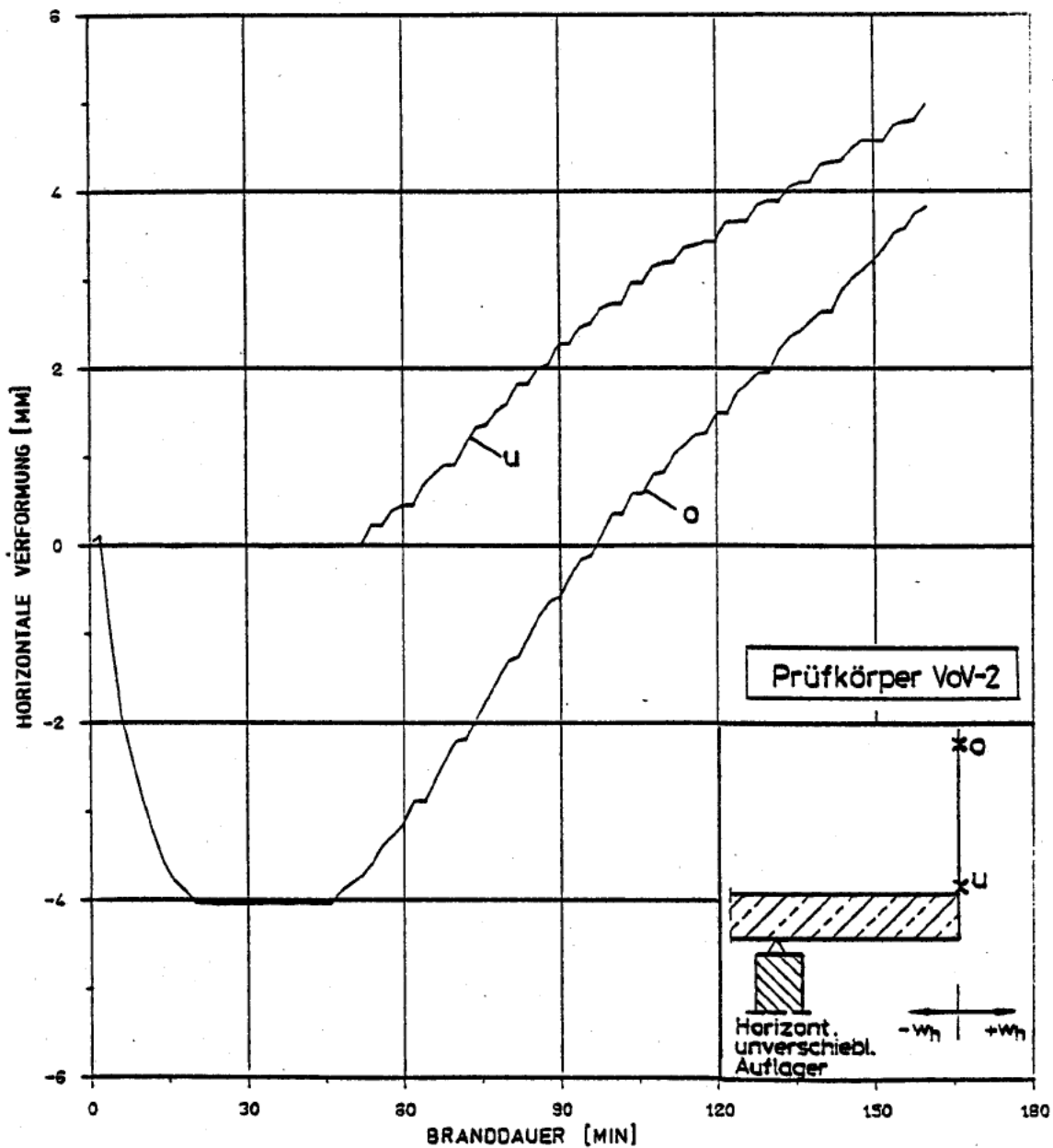
Anlage 14: Horizontale Verformungen am Kragarmende auf der Seite des verschieblichen Auflagers, Prüfkörper VoV-1



Anlage 15: Horizontale Verformungen am Kragarmende auf der Seite des unverschieblichen Auflagers, Prüfkörper VoV-1



Anlage 16: Horizontale Verformungen am Kragarmende auf der Seite des verschieblichen Auflagers, Prüfkörper VoV-2



Anlage 17: Horizontale Verformungen am Kragarmende auf der Seite des unverschieblichen Auflagers, Prüfkörper VoV-2